



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MONITOROVÁNÍ STAVU MECHATRONICKÝCH SYSTÉMŮ

CONDITION MONITORING OF MECHATRONIC SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Bohdan Horňan

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Bohdan Horňan

ID: 192179

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Monitorování stavu mechatronických systémů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou monitorování mechatronického systému z pohledu elektrického pohonu.
2. Proved'te literární rešerši existujících algoritmů pro monitorování stavu a prediktivní diagnostiku mechatronických systémů. Zaměřte se na metody využívající měřené fázové proudy, napětí stejnosměrného meziobvodu a snímače polohy střídavých motorů.
3. Seznamte se s doporučeným Simulinkovským schématem vektorového řízení synchronního motoru. Rozeberte možnosti simulace vybraných poruch a do schématu je zapracujte.
4. Vyberte některé metody monitorování stavu a prediktivní diagnostiky (například „current signature analysis“) a naimplementujte je do upraveného Simulinkovského schématu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] P. Karban: Výpočty a simulace v programech MATLAB a Simulink. Computer Press, a.s., ISBN 978-80-2-1-1448-3, 2006.

Uživatelské manuály k programu MATLAB/Simulink a další literatura dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 17.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto práca je zameraná na monitorovanie a kvantitatívnu analýzu stavov synchronných motorov. Neustále zvyšujúce sa požiadavky na spoľahlivosť motorov rozvíjajú nové metódy prediktívnej diagnostiky, ktoré dokážu identifikovať poruchové stavy už v počiatkoch štádia. Vytvorené mechatronické systémy s naimplementovanou poruchou z predpripraveného modelu PMSM sú testované nekonvenčnými monitorovacími metódami. Softwarové riešenia diagnostiky a návrhy modelov mechatronických systémov sú realizované v prostredí MATLAB & Simulink. Súčasťou práce je aj krátky úvod do problematiky s nevyhnutným teoretickým základom a rešerš niektorých vybraných metód prediktívnej diagnostiky.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

MATLAB & Simulink, MCSA, monitorovanie stavu, Parkov vektor, PMSM, prediktívna diagnostika, Simscape

ABSTRACT

This thesis is concerned with condition monitoring and quantitative analysis of synchronous motors. Constantly rising requirements on the reliability of motors develop new methods of predictive diagnostics, which can identify failure conditions in the initial stage. Created mechatronic systems with the implemented failure from pre-prepared PMSM model are tested by unconventional condition monitoring methods. Software solutions of diagnostics and model designs of the mechatronic systems are implemented in MATLAB & Simulink. Part of this work is also a short introduction to the issue with necessary theoretical fundamentals and research of some selected methods of predictive diagnostics.

KEYWORDS

MATLAB & Simulink, MCSA, condition monitoring, Park's vector, PMSM, predictive diagnostics, Simscape

HORŇAN, Bohdan. *Monitorování stavu mechatronických systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2021, 73 s. Diplomová práce. Vedúci práce: doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Bc. Bohdan Horňan
VUT ID autora: 192179
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2020/21
Téma závěrečné práce: Monitorování stavu mechatronických systémů

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som sa chcel poďakovať svojmu školiťovi pánovi doc. Ing. Petrovi Blahovi, Ph.D. za ochotu, trpezlivosť, odborné vedenie a podnetné návrhy pri písaní tejto záverečnej práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať svojim blízkym, obzvlášť svojim rodičom za podporu počas celého štúdia na VUT.

Obsah

Úvod	14
1 Teoretický úvod	16
1.1 Synchronný motor	16
1.2 Synchronný motor s permanentnými magnetmi	17
1.3 Clarkovej a Parkova transformácia	18
1.4 Vektorové riadenie	20
1.5 Monitorovanie stavov motorov	22
1.6 Poruchy v elektrických motoroch	22
1.7 Prístupy prediktívnej diagnostiky	23
1.8 Vibrodiagnostika	23
1.9 Analýza prejavov na elektrickom signále motora	24
1.10 Analýza prejavu prúdov v motore	25
1.10.1 IPSA – Analýza okamžitého prejavu na výkone motora	26
1.10.2 Analýza prejavu prúdov s Parkovým vektorom	27
1.10.3 EPVA – Rozšírená analýza sledujúca Parkov vektor	28
2 Model PMSM a úvod do modelovania mechatronických systémov	30
2.1 MATLAB & Simulink	30
2.2 Simscape a základy fyzikálneho modelovania	30
2.3 Popis základného modelu PMSM v Simulinku	32
2.3.1 Model PMSM	32
2.3.2 Model Enkódera	33
2.3.3 Blok vektorového riadenia	34
2.3.4 Model Frekvenčného meniča	36
2.4 Modelovanie mechatronických systémov	37
2.5 Modelovanie jednoduchých mechanických porúch	38
2.6 Simulácia PMSM pohonu	39
3 Drhnutí efekt v mechatronickom systéme	40
3.1 Drhnutie motora	40
3.2 Model mechatronického systému s drhnutím	40
3.3 Implementácia prediktívnej diagnostiky do modelu s efektom drhnutia	41
3.4 Vyhodnocovacia metrika	41
3.5 Algoritmus prediktívnej diagnostiky	42
3.6 Simulácie drhnutia	44

4 Diagnostika ložísk	49
4.1 Model ložiska a model poruchy	51
4.2 Implementácia prediktívnej diagnostiky do modelu s poruchou na lo- žisku	53
4.3 Simulácia systému s poruchou na ložisku	53
5 Mechatronický systém s vôľou v prevode	59
5.1 Vôľa v prevodoch	59
5.2 Model mechatronického systému s vôľou v prevode	60
5.3 Implementácia diagnostiky do navrhnutého modelu s vôľou v prevode	61
5.4 Simulácia systému s vôľou v prevode	62
Záver	65
Literatúra	67
Zoznam symbolov a skratiek	71

Zoznam obrázkov

1.1	Umiestnenie magnetov: V a) SMPMSM, v b) IPMSM. Obrázok prevzatý a upravený z [3].	17
1.2	Clarkovej transformácia	18
1.3	Parkova transformácia	19
1.4	Priebeh transformácii signálov vo vektorovom riadení. Obrázok prevzatý a upravený z [6].	20
1.5	Algoritmus vektorového riadenia	21
1.6	Problémy indukčných motorov. Obrázok prevzatý a upravený z [11]. .	22
1.7	Monitorovací proces MCSA	25
1.8	Porovnanie výkonového spektra funkčného motora metódou MCSA (sledovanie prúdu) a IPSA (sledovanie výkonu). Obrázok prevzatý a upravený z [16].	27
1.9	Metóda založená na sledovaní Parkovho vektora: Zobrazenie trojfázového signálu a jeho grafická reprezentácia v α - β súradniciach	28
1.10	Porovnanie vhodnosti metód prediktívnej diagnostiky pri konkrétnej poruche. Obrázok prevzatý a upravený z [10].	29
2.1	Základy Simscape: V a) je široký výber komponentov z rôznych domén (prevodovka, dióda, prvok variabilnej reluktancie, zdroj teploty). V b) sú dva typy prípojných miest. V c) sú konvertory na prepojenie Simulink a Simscape. V d) je znázornené, že priame prepojenie medzi dvomi nie je možné.	31
2.2	Schéma PMSM pohonu v Simscape [24]	32
2.3	Model enkódera v Simscape	33
2.4	V a) je zobrazený blok vektorového riadenia PMSM, v b) je zobrazená jeho samotná štruktúra v Simulinku	34
2.5	Grafické znázornenie získania SPWM signálu. Obrázok prevzatý a upravený z [26].	35
2.6	Model frekvenčného meniča v Simscape	36
2.7	Schéma jednoduchej pohonnej jednotky automobilu a jej model v Simscape	37
2.8	Príklad jednoduchej poruchy a jej pripojenie do modelu v Simulinku. V a) je zobrazená namodelovaná jednoduchá porucha a v b) je zobrazený detail schémy PMSM pohonu, do ktorého je pripojený subsystém jednoduchej poruchy.	38

2.9	Výsledky simulácie PMSM: V a) je vidieť priebeh požadovaného a skutočného točivého momentu PMSM, v b) je zobrazený priebeh požadovaných a dosiahnutých otáčok PMSM a v c) priebeh trojfázových napájacích prúdov.	39
3.1	Naprogramovaný algoritmus: V a) je priebeh trojfázového prúdu vybratého úseku, v b) je jeho interpretácia po Clarkovej transformácii. Užívateľ si vyberá skúmaný úsek, ktorý ho zaujíma. To je znázornené v c) a v d), kde je zobrazený priebeh krútiaceho momentu, resp. uhlovej rýchlosti PMSM v závislosti od času.	42
3.2	Naprogramovaný výstup algoritmu	44
3.3	Výsledky simulácie PMSM s efektom drhnutia, ktorý bol nastavený na 15 Nm. Nastavené parametre simulácie sú totožné s Obr. 2.9. V a) je vidieť priebeh požadovaného a skutočného točivého momentu PMSM, v b) je vykreslený priebeh poruchového momentu, v c) je zobrazený priebeh požadovaných a dosiahnutých otáčok PMSM a v d) priebeh trojfázových napájacích prúdov.	45
3.4	Výsledky diagnostiky pomocou naprogramovaného algoritmu – metódy založenej na sledovaní Parkoveho vektora. Veľkosť efektu drhnutia bol zvolený v rozmedzí 0 Nm až 15 Nm. Každou ďalšou simuláciou bola jeho veľkosť zväčšená o 20 %. Modrá krivka reprezentuje ideálnu Lissajousovu krivku podľa vypočítaného ideálneho polomeru, červená krivka predstavuje elipsou aproximovanú Lissajousovu krivku z nameraných dát predstavených čiernou krivkou. Červený bod reprezentuje stred elipsy posunutý od počiatku súradnicového systému.	46
3.5	Detail simulácie nameraného trojfázového prúdu po dosiahnutí požadovaných otáčok a pri pôsobení brzdného momentu 15 Nm v čase $\langle 0,5\text{ s}; 0,6\text{ s} \rangle$	47
3.6	Priebehy ďalších identifikátorov stavu motora. V a) je zobrazená závislosť normalizovaného kvadratického kritéria od veľkosti poruchy. Ďalej je vyobrazená aproximovaná exponenciála tejto závislosti. V b) sú zobrazené veľkosti vypočítaných odhadov ideálneho priemeru Lissajousových kriviek a maximálne hodnoty v nameraných dátach v závislosti od veľkosti poruchy.	48
4.1	Výkres guľčkového ložiska pripojeného na hriadeľ: Pohľad nárys a bokorys s priblíženým detailom na rez bokorysom. Výkres je ďalej doplnený o charakteristické parametre ložiska.	49

4.2	Detail priblíženej oblasti z Obr. 4.1: Nedokonalosti jednotlivých prvkov, ktoré vedú k poruchám ložiska. Konkrétne je zobrazená povrchová nedokonalosť valivej guľičky a defekty na povrchoch vnútorného a vonkajšieho krúžku.	50
4.3	Výsledky diagnostiky za použitia metódy založenej na sledovaní Parkovho vektora na mechatronický systém s poruchovým ložiskom. Prvá simulácia predstavuje bezporuchový systém. Veľkosť poruchy na vonkajšom krúžku sa zhoršoval každou ďalšou simuláciou o 20 %. Modré vzory reprezentujú preložené Lissajousove krivky v ustálenom stave po dosiahnutí požadovaných otáčok 900 min^{-1} v čase simulácie 0,5-2,0 s a pri pôsobení momentovej záťaže 18 Nm. Čierna krivka predstavuje jednu otáčku valivého elementu v ložisku v čase simulácie 0,989-1,056 s.	54
4.4	Výsledky prediktívnej diagnostiky pri použití metódy EPVA (rozšírenej metódy sledujúcej Parkov vektor) na mechatronický systém s poruchou (prasklinou na vonkajšom krúžku ložiska). Prvý graf zobrazuje výkonové spektrum bezporuchového systému, kde zvislá os je v decibeloch. Ďalej sú na obrázkoch znázornené výkonové spektrá modulov Parkovho vektora bezporuchového stavu (modré spektrum) a poruchového stavu (čierne spektrum). Každou ďalšou simuláciou sa porucha zhoršovala o 20 %. Parametre simulácie sú totožné ako v Obr. 4.3.	56
4.5	Výsledky prediktívnej diagnostiky pri použití metódy EPVA (rozšírenej metódy sledujúcej Parkov vektor) na mechatronický systém s poruchou (prasklinou na vnútornom krúžku ložiska). Prvý graf zobrazuje výkonové spektrum bezporuchového systému. Druhý obrázok zobrazuje výkonové spektrá modulu Parkovho vektora bezporuchového stavu (modré spektrum) a poruchového stavu (čierne spektrum).	57
5.1	Vôľa v prevode pri jednom zábere spárených zubov ozubených kolies. Obrázok prevzatý a upravený z [31].	59
5.2	Schéma mechatronického systému s vôľou v prevode v Simscape	60
5.3	Výsledky simulácie mechatronického systému s vôľou v prevode. V a) je priebeh požadovaných otáčok, otáčok motora a výstupného hriadeľa. V b) je zobrazený priebeh výstupného točivého momentu a generovaného momentu motorom. Ďalej sú zobrazené detaily momentových rázov. V c) je časový priebeh veľkosti medzery v prevodovke.	62
5.4	Priblíženie priebehov simulácie z Obr. 5.3 vo vybratých sektoroch. V a) je detail priebehu rýchlostí na hnacom a hnanom hriadeľi. V b) je detail priebehu medzery.	63

5.5	Priebeh veľkosti vôle v prevode v závislosti od času	64
-----	--	----

Zoznam tabuliek

2.1	Nastavené parametre bloku PMSM v simuláciách	33
4.1	Konštrukčné parametre ložiska triedy 6004	51
4.2	Kritické frekvencie ložiska triedy 6004 pri rýchlosti otáčania 900 min^{-1}	52

Úvod

Elektrické pohony, stroje a všetky príbuzné zariadenia hrajú kľúčovú rolu v rapídne rozvíjajúcom sa technologickom svete. Sú nevyhnutnosťou v modernom priemysle a živote. Umožňujú premenu elektrickej energie na mechanickú, vďaka čomu sa s nimi stretáme takmer na každom kroku – od malých zariadení na každodenné použitie až po elektromotory v ťažkom priemysle. Viac ako dve tretiny všetkej priemyselnej spotreby energie pripadá na napájanie elektrických motorov, ktorých každý aspekt sa neustále vyvíja. Rozšíreným typom elektromotorov sú synchronné motory.

Z hľadiska finančnej úspory výrobných nákladov sú dôležité dva parametre motora: účinnosť a spoľahlivosť. Zatiaľ čo účinnosť je jednostranná záležitosť – minimalizovať už tak veľmi nízke energetické straty, spoľahlivosť motora predstavuje veľkú výzvu pre tímy inžinierov. Aj keď sú motory pomerne robustné stroje, pracujú v nepretržitom chode a ich dlhodobým používaním môžu prirodzene nastať poruchové stavy. Akékoľvek ich vyradenie (aj na krátku dobu) môže pre spoločnosť znamenať významnú ekonomickú stratu. Preto sa čoraz viac kladie dôraz na zvýšenie spoľahlivosti motorov. Ich správny návrh, chod, vhodná údržba a diagnostika sú kľúčovou vecou.

Mechanické a elektrické nerovnováhy, zhoršenie kvality izolácie na vinutiach statora, ložiskové závady atď. sú len malým zlomkom technických závad, ktoré môžu nastať. Vhodnou prediktívnou diagnostikou je možné presne určiť typ, rozsah poškodenia a odhadnúť životnosť motora už v skorom štádiu pôsobenia poruchy. Nárast dôležitosti motorov od druhej polovice dvadsiateho storočia znamenal obrovský záujem o analýzu poruchových stavov a prediktívnej diagnostiky. Za ten čas vyšli stovky článkov, ktoré sa zaoberajú sa rôznymi technikami monitorovania stavov motorov. Metódy sa postupom času zdokonaľovali a podľa ich vhodnosti sa aplikovali na konkrétny problém. V súčasnosti sa do popredia dostávajú metódy, ktoré nenarúšajú chod motora, dokážu pracovať v reálnom čase a priamo v prevádzkových podmienkach. Tieto body spĺňajú metódy založené na sledovaní elektrických veličín. Jednou z týchto metód je čoraz viac populárnejšia MCSA (*Motor Current Signature Analysis*).

Táto práca nadväzuje na výstup semestrálneho projektu z [1] a je možné ju rozdeliť na dva hlavné bloky – teoretický a praktický. Prvá kapitola obsahuje teoretickú časť, v ktorej je popísaný nevyhnutný teoretický základ problematiky synchronného motora a jeho riadenia. Druhá časť teórie sa venuje niektorým prístupom prediktívnej diagnostiky. V druhej kapitole je podrobne rozobratý predpripravený model synchronného motoru v Simulinku, ktorý je využívaný v praktickej časti. Kapitola ďalej obsahuje navrhnuté postupy modelovania jednoduchých mechanických porúch a mechatronických systémov. Praktický blok obsahuje tri kapitoly, v ktorých sú po-

skytnuté informácie o vybratej poruche, o jej návrhu a implementácii do dodaného modelu. Model je ďalej doplnený o navrhnuté algoritmy prediktívnej diagnostiky. Konkrétne tretia kapitola sa venuje drhnúcim stavom v motore, štvrtá kapitola ložiskovým závadám a piata kapitola vôli v prevodoch. Navrhnuté riešenia sú realizované v prostredí MATLAB & Simulink.

1 Teoretický úvod

1.1 Synchronný motor

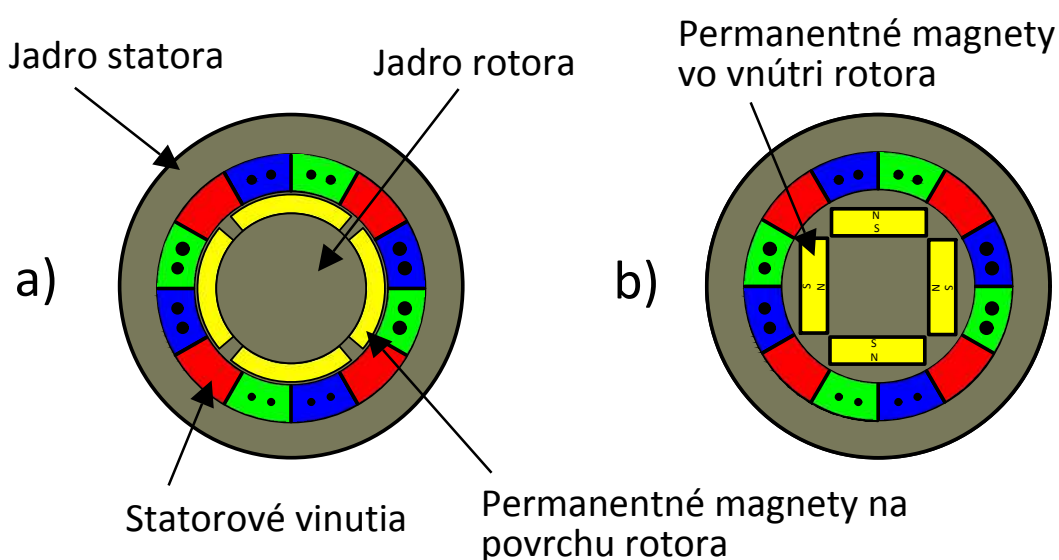
Synchronný motor je točivý elektrický stroj, ktorý sa skladá z dvoch základných častí – stator a rotor. Stator je pevná časť, ktorá pozostáva zo železnej kostry, jadra a trojfázového vinutia. Železná kostra chráni vnútorné časti. Laminované jadro statoru znižuje straty vírivých prúdov a hysterézne straty. Trojfázové statorové vinutie, uložené drážkach sa pripája na trojfázovú sieť. Po vybudení vytvára točivé magnetické pole RMF (*Revolving Magnetic Field*), ktoré sa začne točiť synchronnou rýchlosťou. Na rotore (točiaca sa časť motora) sa nachádza ďalšie vinutie, ktoré je na rozdiel od statora pripojené na zdroj jednosmerného napätia. To po vybudení vytvára statické magnetické pole. Činnosť synchronného motora je založená na interakcii rotujúceho magnetického poľa statora a konštantného magnetického poľa rotora. Opačné póly RMF a rotora sa k sebe pritiahnú a magneticky uzamknú. Tento jav má za následok, že rotor sa začne točiť synchronnou rýchlosťou, akou sa točí rotujúce magnetické pole. K rotoru je pripojený hriadeľ, ktorým je prenášaný generovaný rotačný pohyb do ďalších častí mechanického systému. [2]

Synchronné motory bežia na konštantnej rýchlosti, bez ohľadu na pôsobiacu záťaž, ktorá je v rámci normy motora. Rýchlosť motora je možné zmeniť jedine cez frekvenciu zdroja. Základným nedostatkom týchto motorov je neschopnosť štartu bez cudzej pomoci. To je spôsobené tým, že rotor má svoju vlastnú zotrvačnosť a nedokáže okamžite zareagovať na pohyb točivého magnetického poľa. Jednou z možností ako naštartovať motor synchronne po pripojení do elektrickej siete je použitie kľetkového vinutia s asynchronným naštartovaním, prípadne použitie frekvenčného meniča alebo pomocného rozbehového motora. A zase iným spôsobom naštartovania je vektorové riadenie. [2]

Synchronné motory sú charakterizované vysokou účinnosťou. Používajú sa v oblastiach, kde je potrebné zaistiť vysokú presnosť, v rýchlostnej, resp. polohovej regulácii alebo v aplikáciách, ktoré vyžadujú dlhodobu konštantnú otáčku. Preto je ich uplatnenie rozsiahle. Sú rozšírené najmä v automobilovom priemysle (elektromobily) a energetickom priemysle (turbogenerátory), ďalej v servách, v polohovacích ramenách, v robotických aktuátoroch atď. Existuje niekoľko typov synchronných motorov. Táto práca sa bude konkrétne zaoberať synchronným motorom s permanentnými magnetmi (*Permanent Magnet Synchronous Motor*). Tento typ motora bude podrobnejšie vysvetlený v nasledujúcej kapitole.

1.2 Synchronný motor s permanentnými magnetmi

Koncept PMSM vychádza z vlastností synchronného motora s niektorými odlišnosťami. Namiesto klasického vinutia v rotore sú použité permanentné magnety, ktoré vytvárajú konštantné magnetické pole. Vinutie statora je rozložené sínusovo, čo má za následok sínusový priebeh magnetického toku v závislosti od uhla natočenia. Podľa umiestnenia magnetov v rotore rozlišujeme dva základné typy – SMPMSM (*Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor*) a IPMSM (*Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*). Prvá varianta má magnety rozložené na povrchu rotora (Obr. 1.1a), kým druhá varianta ich má zase rozložené vo vnútri rotora (Obr. 1.1b). [3]



Obr. 1.1: Umiestnenie magnetov: V a) SMPMSM, v b) IPMSM. Obrázok prevzatý a upravený z [3].

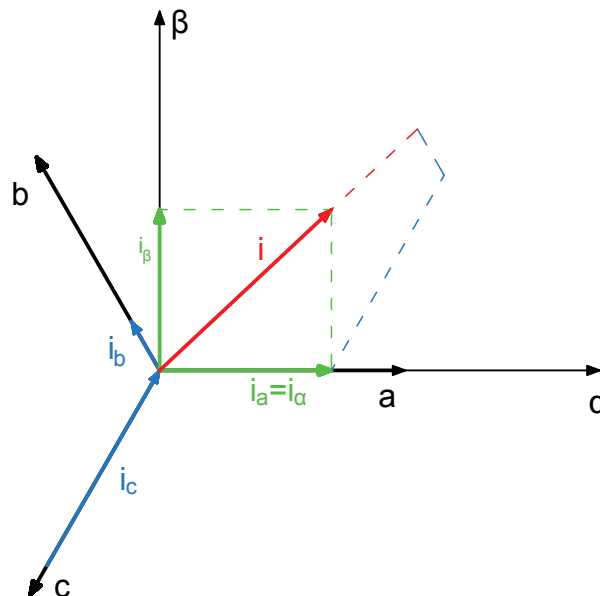
Použitý typ umiestnenia magnetov má vplyv na pozdĺžnu a priečnu indukčnosť v nových d-q súradniciach. Parameter indukčnosti je závislý len od geometrie magnetov. V prípade umiestnenia magnetov na povrchu rotora (rotor je magneticky okrúhly), pozdĺžna indukčnosť L_d a priečna indukčnosť L_q sa rovnajú z dôvodu rovnakej reluktancie na celej ploche. Permanentné magnety umiestnené vo vnútri rotora majú rozdielnú indukčnosť v priečnom aj pozdĺžnom smere. Táto vlastnosť produkuje dodatočný reluktančný krútiaci moment, ktorý sa pričítava k momentu generovanému permanentnými magnetmi. [3]

PMSM sa používajú vo vysokovýkonných procesoch, kde je nutné zaistiť rýchle zmeny v pohybe a zároveň zachovať hladký a rýchly prechodový dej. K zmene rýchlosti a krútiaceho momentu je potrebný frekvenčný menič.

Pre úplnosť je ešte vhodné uviesť, že existujú dve základné stratégie riadenia motorov: skalárne (nepoužíva sa však pre synchronné motory) a vektorové. Skalárnym riadením sa mení len magnitúda veličín. Vzťahy medzi prúdom, napätím a frekvenciou sú konštantné pri celom otáčkovom rozsahu motora. Frekvencia je nastavená priamo v závislosti od požadovanej rýchlosti. Magnitúdy elektrických veličín sa volia tak, aby ich pomer bol konštantný. Preto možno povedať, že ide len o ovládanie bez spätnej väzby. Výhodou je jednoduchá implementácia do asynchronných motorov a nenáročnosť hardvéru. Na druhej strane však skalárne riadenie poskytuje nízky dynamický výkon a nerieši stabilitu pri prekročení určitých frekvencií. Z hľadiska precíznosti a možnosti regulácie je oveľa zaujímavejšie vektorové riadenie (FOC – *Field Oriented Control*), pri ktorom sa reguluje prúdový vektor trojfázového statorového vinutia. [4]

1.3 Clarkovej a Parkovej transformácia

Pred predstavením vektorového riadenia je dôležité zmieniť sa o použitých matematických aparátoch, ktoré sú pre toto riadenie kľúčové. Hlavná myšlienka spočíva v zjednodušení signálu na takú úroveň, s ktorou je možné ďalej pracovať v regulačných obvodoch. Trojfázový striedavý prúd v časovej oblasti je Clarkovej transformáciou prevedený do α - β súradníc. Touto transformáciou dostaneme z troch fázových prúdov jeden rotujúci vektor s reálnou zložkou i_α a imaginárnou zložkou i_β , viď Obr. 1.2.

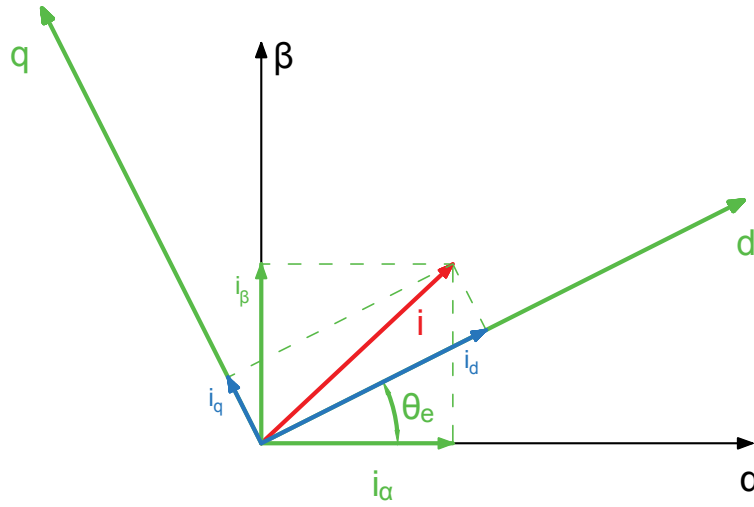


Obr. 1.2: Clarkovej transformácia

Keďže ide o systém v rovnováhe a platí Prvý Kirchhoffov zákon, táto transformácia sa zjednoduší na výraz (1.1), konkrétne táto varianta zachováva veľkosť amplitúdy signálov.

$$i_{\alpha\beta}(t) = \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Pevný súradnicový systém je vhodné prepočítať z pohľadu rotora do d-q súradníc (*direct and quadrature axis*), v ktorých sa prúdy, napätia a magnetické toky javia ako konštantné veličiny v ustálenom stave. To dosiahneme aplikovaním Parkovej transformácie. Tá je znázornená na Obr. 1.3, a je daná vzťahom (1.2):



Obr. 1.3: Parkova transformácia

$$i_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \sin(\theta_e) \\ -\sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

kde i_d a i_q sú zložky prúdového vektora motora a θ_e je okamžité uhlové natočenie rotora. Pomocou týchto transformácií môže byť v uzavretých regulačných obvodoch použitý konštantný alebo skokový referenčný signál. Inverznými transformáciami je možné vrátiť sa späť do predošlých súradnicových systémov. Pri použití inverznej Parkovej transformácie sa prepočítajú súradnice z rotačného súradnicového systému na pevný súradnicový systém vzťahom (1.3):

$$i_{\alpha\beta}(t) = \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

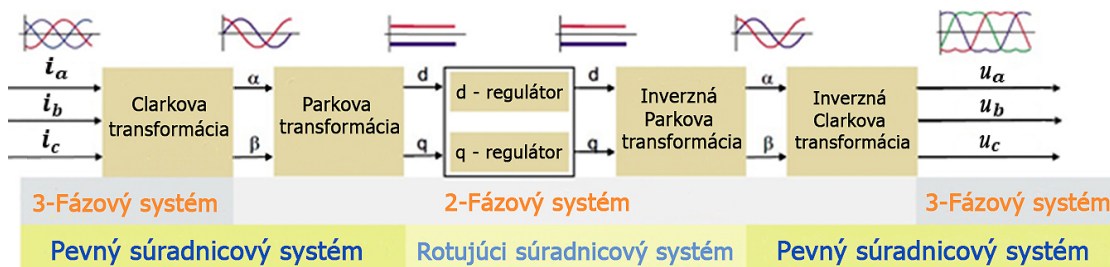
Inverznou Clarkovej transformáciou je nakoniec možné dostať sa z α - β súradníc do pôvodných trojfázových súradníc vzťahom (1.4).

$$i_{abc}(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

1.4 Vektorové riadenie

Synchrónne motory v moderných aplikáciach vyžadujú presné riadenie krútiaceho momentu na širokej škále otáčok pri vysokom dynamickom výkone, s možnosťou rýchleho zrýchlenia a spomalenia. K tomu sa čoraz viac využíva stratégia vektorového riadenia.

Základná myšlienka vektorového riadenia spočíva v riadení trojfázových prúdov statora tak, že po matematických transformáciach prúdová zložka i_q reguluje požadovaný elektromagnetický krútiaci moment, zatiaľ čo nulová zložka i_d udržiava magnetický tok na menovitej hodnote. Trojfázové prúdy sú Clarkovej a Parkovou transformáciou prepočítané do d-q súradníc s i_d a i_q zložkou, viď Obr. 1.4. Tieto zložky tvoria prúdový vektor, z čoho sa odvodzuje aj názov tejto stratégie. [5]

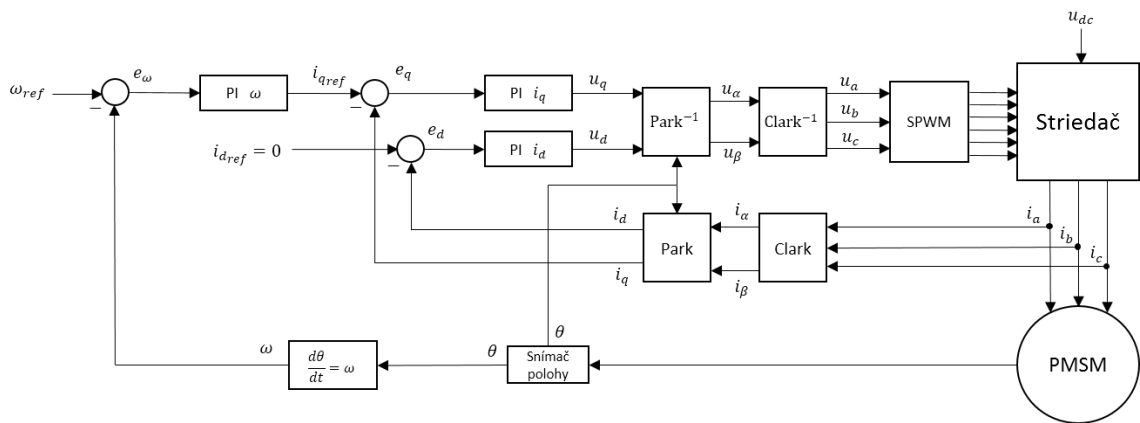


Obr. 1.4: Priebeh transformácii signálov vo vektorovom riadení. Obrázok prevzatý a upravený z [6].

Vektorové riadenie sa mierne líši v závislosti od typu PMSM. V prípade typu SMPMSM, ktorý je použitý v tejto práci, dôležitým predpokladom je správna orientácia i_d zložky. Tá je pevne viazaná presne v smere magnetického toku rotora. Potom prúd i_q je výhradne jediná momentotvorná zložka, pričom i_q definuje veľkosť elektromagnetického krútiaceho momentu M_k . Maximálny krútiaci moment sa dosiahne vtedy, keď magnetické polia statora a rotora sú presne pod uhlom 90° . V prípade ďalšieho typu (IPMSM) je cieľom vektorového riadenia udržiavať prúdovú zložku i_d na nulovej hodnote a maximalizovať generovaný moment pri minimálnom prúde.

Konkrétne ide o stratégiu riadenia maximálneho momentu na ampér (MTPA – *Maximum Torque per Ampere*). [5]

Jedna z možných viacerých variantov algoritmu vektorového riadenia (konkrétne pre SMPMSM) je znázornená na Obr. 1.5. Po transformáciach sú zložky prúdového vektora v d-q súradniciach porovnávané s referenčnými hodnotami, ktoré sú vstupmi do regulačných obvodov s PI regulátormi. Vonkajší regulačný obvod – riadenie otáčok motora je dosiahnuté zo znalosti požadovaných a okamžitých otáčok. Keďže len zložka i_q má na starosti tvorbu krútiaceho momentu, výstup z regulátora otáčok je možné použiť ako referenčnú hodnotu prúdu i_{qref} vo vnútornom obvode kaskádnej regulácie. V druhom regulačnom okruhu dochádza k riadeniu magnetického toku. Celkovo sú použité tri PI regulátory. V PMSM, na rozdiel od indukčných motorov, tokotvorná zložka i_d sa môže udržiavať na nule, pretože magnetický tok je tvorený permanentnými magnetmi. Preto sa referenčná hodnota i_{dref} volí nulová. [5]



Obr. 1.5: Algoritmus vektorového riadenia

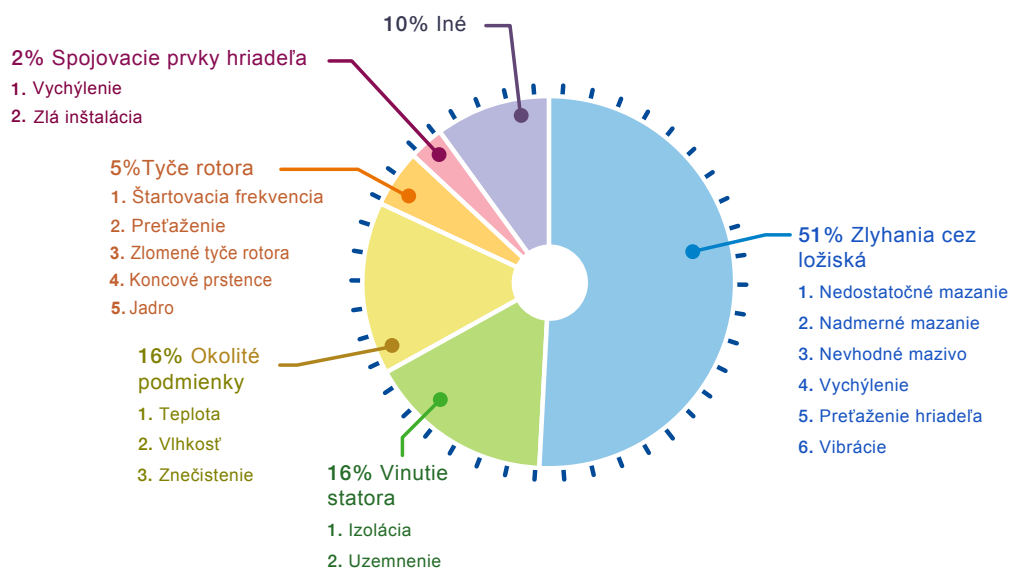
Výstupom prúdových regulátorov je napäťový akčný zásah v_q a v_d , ktorý nie je v pôvodných súradniciach. Jeho veľkosť je prepočítaná inverznou Parkovou a Clarkovej transformáciou na trojfázové napätia (Obr. 1.5). Posledným krokom algoritmu vektorového riadenia je generovanie signálu pulznej šírkové modulácie (PWM – *Pulse Width Modulation*). Na základe tohto signálu je pomocou výkonovej elektroniky vytvorený striedavý sínusový signál, ktorým je možné napájať motor. Na premenu jednosmerného napätia, resp. jednosmerného prúdu na striedavé napätie, resp. na striedavý prúd, sa konkrétne používa frekvenčný menič (striedač). Pre orientáciu v rotačnom súradnicovom systéme je potrebné poznať smer a polohu magnetického toku. Preto sa na snímanie okamžitého natočenia použije enkóder.

1.5 Monitorovanie stavov motorov

Monitorovanie stavov elektrických pohonov je zložitá vedná disciplína. Jej hlavným cieľom je zaistiť bezpečný, spoľahlivý a plynulý chod elektrického zariadenia [7]. V tejto súvislosti hrá prediktívna diagnostika základnú rolu za účelom splnenia týchto požiadaviek. Prediktívnu diagnostiku možno chápať ako súbor krokov na zariadení založených z predchádzajúcich znalostí o prevádzkovom stave, ktorý bol určený na základe stanovených parametrov. Na rozdiel od klasickej (konvenčnej) diagnostiky, prediktívna diagnostika sa snaží odhaliť poruchy už v začiatočnom štádiu, monitorovať ich a stanoviť ich pokračujúci priebeh. [8]

1.6 Poruchy v elektrických motoroch

Porucha je sled chýb, ktoré sa postupne stupňujú až do režimu, v ktorom motor buď nie je schopný plniť požadovanú funkciu, alebo ju plní v obmedzenom režime [9]. Predtým než sa budú rozoberať samotné poruchy elektrických motorov, je nutné sa zaoberať ich príčinami, ktoré môžu prameniť z mechanických podmienok alebo z elektrických podmienok, alebo z podmienok okolitého prostredia. Čo sa týka mechanických podmienok, tie sa odvíjajú najmä od výsledného správania sa záťaže. Tá môže spôsobiť napr. preťaženie, prekročenie prevádzkovej rýchlosti, zvýšené mechanické namáhanie a iné. Elektrické podmienky sú spojené s kolísaním alebo náhlou zmenou prúdu, resp. napätia. A nakoniec sú to environmentálne podmienky, v ktorých je motor použitý. Najčastejšie ide o vysokú teplotu, vlhkosť či znečistené prostredie, čo sa môže prejaviť na prehriatí alebo kontaminácii motora. [10]



Obr. 1.6: Problémy indukčných motorov. Obrázok prevzatý a upravený z [11].

Podľa starších výskumov v [12] alebo aktuálnejších štatistík v [11], najčastejšie príčiny zlyhania v trojfázových indukčných motoroch sú mechanického charakteru. Najproblematickejšie prvky sú ložiská a stator motora. Na Obr. 1.6 je možné vidieť, že vyše polovica celkových porúch je v ložiskách. Čo sa týka statorovej časti, väčšinou ide o uzemnenie a zhoršenie kvality izolácie plynutím času. Nezanedbateľné percento zlyhaní elektrickej časti motora tvoria aj problémy v rotore: zničené rotorové tyče, zlomené koncové prstence, excentricita, štruktúra jadra atď. Tieto najrozšírenejšie príčiny porúch musia byť detekované tak skoro, ako je to možné, aby sa predišlo fatálnym zlyhaniam, ktoré by viedli k vyradeniu motora a k následným stratám vo výrobe. [12]

Štatistika najčastejších porúch znázornená na Obr. 1.6 jednoznačne poukazuje na závažnosť poruchy mechanického charakteru. Aj keď sa tieto štatistiky týkajú len asynchrónnych motorov, stále sú relevantným zdrojom informácií na odhad najčastejších porúch aj synchrónnych motorov. Aj výskumná časť tejto práce sa bude venovať práve poruchám v dôsledku mechanických podmienok.

1.7 Prístupy prediktívnej diagnostiky

V nasledujúcich kapitolách budú v krátkosti predstavené niektoré postupy prediktívnej diagnostiky, ktoré sa používajú na vyhodnotenie stavu motora. Tieto metódy sa, samozrejme, nezaobídu bez skúseného experta v danej oblasti. Monitorovanie stavov motorov v súčasnosti smeruje k plne automatizovanému počítačovému konceptu, čím sa eliminuje ľudský faktor pri rozhodnutí. Aj keď je tento koncept ešte len vo svojej začiatkovej fáze, prvky umelej inteligencie pomaly, ale isto začínajú prenikať aj do tejto sféry.

1.8 Vibrodiagnostika

Vibračná analýza patrí medzi najstaršie a zároveň najúspešnejšie metódy. Ide o metódu založenú na meraní vibrácií. Pod vibráciou sa rozumie rýchly periodicky opakovateľný pohyb rôznych častí motora počas oscilácií vzhľadom na ich rovnovážnu polohu. Je reprezentovaná ako progresívny translačný pohyb vo všetkých vzájomne kolmých osiach a ako rotačný pohyb okolo týchto osí. Všetky nezrovnalosti a problémy motora, či už mechanického alebo elektromagnetického pôvodu, sa prejavujú na zaznamenanom vibračnom signále. [13]

Štúdium vibrácií sa vykonáva buď v časovej, alebo vo frekvenčnej oblasti. V časovej oblasti je možná analýza na základe zameraného *waveform* signálu, ktorý sa postupne mení v dlhšom časovom horizonte. Porucha generuje vibrácie na hriadelí

motora, v ložiskách a v jadre rotora. Podľa veľkosti oscilácií jednotlivých komponentov sa dá zistiť chybný prvok. Samozrejme tento zjavne jednoduchý prístup sa nedá uplatniť vždy pri zložitých mechanizmoch, pri ktorých sa ťažko rozoznáva vibračný príspevok daného komponentu. Vibračný signál obsahuje veľké množstvo harmonických zložiek, ktoré kmitajú na širokej škále frekvencií. Vibrácie spôsobujú anomálie, ktoré postupne modulujú pôvodný signál. Spektrálnou analýzou je signál dekomponovaný a zo získaného spektra sa vykonaná analýza. Zlogaritmovaním spektra (kepsrálna analýza) sa ešte viac zvýši dôležitosť menších zastúpených zložiek. [14]

Vibračná analýza extrahuje konkrétne informácie z nameraných dát a precízne identifikuje mechanické problémy, ako napr. nerovnováhy, nevyváhy, stavy ložísk, rezonancie, vychýlenie spojovacích zariadení atď. Dáta navyše obsahujú podstatné informácie o vnútramotorových problémoch, akými sú napr. stav vinutí statora, stav rotora excentricita vzduchovej medzere, a dokonca aj o externých elektrických problémoch. V [13] sú zobrazené praktické príklady implementácie vibračnej analýzy a identifikovanie stavu motora. Ako boli motory monitorované v čase, veľkosť vibrácií sa dramaticky zväčšoval vplyvom pretrvávajúcich porúch. Použitie vibračnej analýzy bolo kľúčové na zistenie poruchy a výmeny problematickej časti.

Vibračná analýza zlyháva pri vibračných signáloch s nízkou energiou. Signál môže byť v prípadoch (ako napr. pri experimente skúmaní ložiskových závad v[15]) pohltený šumom s vyššou energiou alebo výraznejšími vibračnými zložkami. Identifikácia porúch pri použití klasickej spektrálnej analýzy vibračného signálu je neúčinná a vyžaduje sa iný prístup.

Ak by sa vibrodiagnostika mala zhrnúť pár slovami, ide o univerzálnu konvenčnú metódu, s ktorou je možné identifikovať takmer všetky hlavné problémy s vysokou presnosťou. Používa sa v kombinácii s inými neinvazívnymi metódami vo všetkých druhoch priemyslu. [13]

1.9 Analýza prejavov na elektrickom signále motora

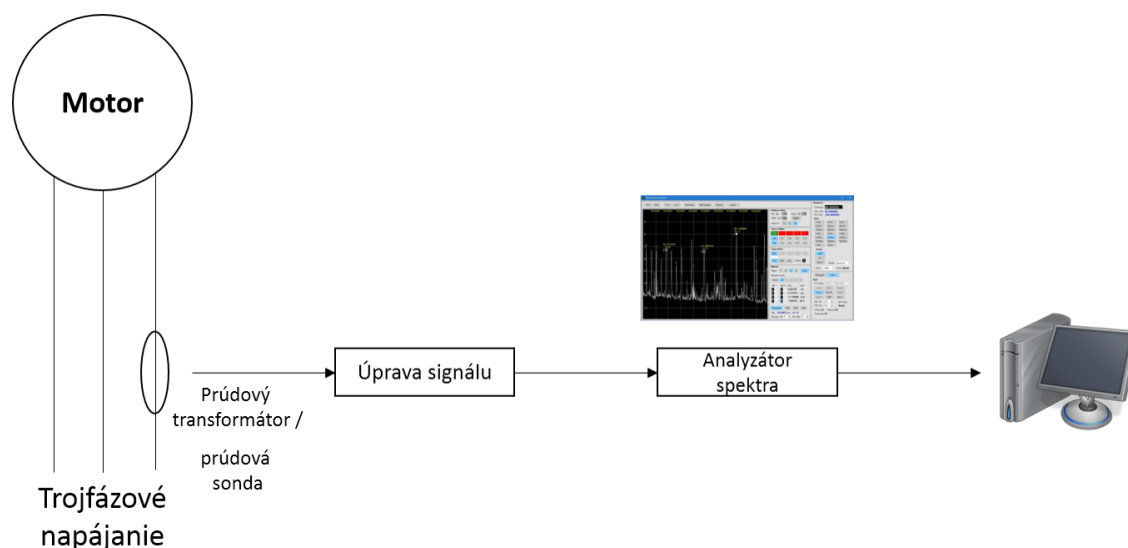
Poruchové stavy, ktoré sa vyskytujú v elektrických motoroch, ovplyvňujú veličiny súvisiace s tvorbou krútiaceho momentu. Na základe možného sledovania elektrických parametrov, ako napr. napätie, elektrický prúd, výkon, sledovanie magnetického toku atď. je možné efektívne monitorovať ich priebeh v skutočnom čase a vyhodnocovať potenciálne poruchy. Všetky metódy na tomto princípe patria do jednej veľkej skupiny: monitorovanie elektrických veličín (ESA – *Electrical Signature Analysis*). Tieto metódy majú spoločné črty: sú nerušivé – nenarúšajú chod mechatronických sústav, nevyžadujú pripojenie dodatočných snímačov, pracujú v reálnom čase a majú schopnosť vzdialeného monitorovania. Výsledkom ich použitia je zníženie času

na prestoj, zvýšená bezpečnosť voči úrazom, zníženie nákladov na údržbu, lepšie riadenie, resp. regulácia, neprerušený chod a lepšie plánovanie údržby.

V nasledujúcich kapitolách budú predstavené niektoré metódy založené na tomto princípe: analýza prejavu prúdov (MCSA), analýza okamžitého prejavu na výkone motora (IPSA), analýza prejavu prúdov s prístupom Parkovho vektora a jej rozšírená varianta EPVA. [10]

1.10 Analýza prejavu prúdov v motore

Analýza prejavu prúdov v motore (angl. MCSA – *Motor Current Signature Analysis*) je metóda založená na monitorovaní priebehu prúdu statora vo vinutí (presnejšie napájacieho prúdu motora). Tento koncept pochádza zo začiatku 70. rokov minulého storočia. Prvý raz bol zrealizovaný v jadrových elektrárnach pre ťažko prístupné motory v nebezpečnom prostredí. V súčasnosti ide o veľmi rapídne rozvíjajúcu sa metódu prediktívnej diagnostiky pre jednoduchosť a výborné výsledky analýzy tejto metódy. Hlavná myšlienka spočíva v identifikovaní indukovaných harmonických zložiek spôsobených poruchou, čo má za následok zmenenú indukčnosť a vzájomnú indukčnosť motora. Napájací prúd jednej fázy je monitorovaný prúdovým transformátorom alebo kliešťovou prúdovou sondou. Jeho signál je zaznamenaný v časovej oblasti. Signál je potom spracovaný metódami, ako napr. FFT (Rýchla Fourierova transformácia – *Fast Fourier Transform*) alebo Vlnkovými transformáciami (*Wavelet transform*). Výsledné spektrum je vyhodnotené analyzátorom spektra. Jednoduchá schéma implementácie tejto metódy je zobrazená na Obr. 1.7. [16]



Obr. 1.7: Monitorovací proces MCSA

Získané frekvenčné spektrum sa často označuje ako „podpis” na motore (z angl. *signature*). Zo získaných vzorov na „podpise” motora je možné rozlíšiť normálne fungujúci motor od poruchového, a dokonca aj detekovať, v ktorej časti motora pravdepodobne dochádza k chybe.

V ideálnom prípade by mal mať signál sínusový priebeh alebo vo frekvenčnej oblasti jeden *peak* na napájacej frekvencii. Skutočný signál obsahuje ďalšie harmonické zložky. Poruchy ďalej modulujú signál a prispievajú k ďalším postranným frekvenčným pásmam okolo hlavnej zložky, t. j. centrálnej frekvencie.

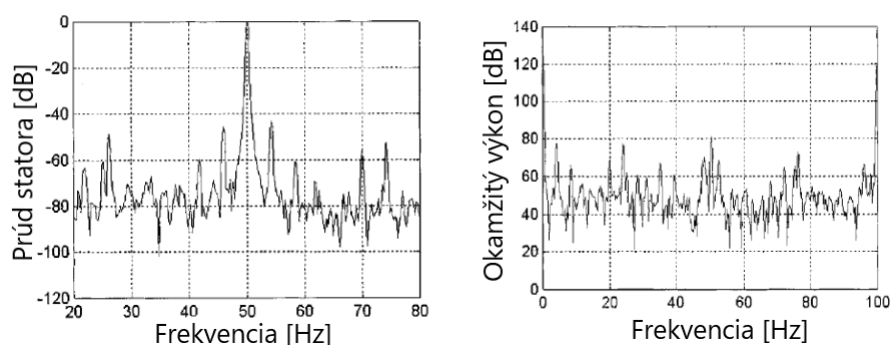
Každá porucha má svoje špecifické postranné pásma na určitých frekvenciách. Tie závisia od konkrétnych vlastností motora (počtu pólov, synchronnej rýchlosti a sklzu) a počítajú sa známymi rovnicami. Vybranú poruchu je možné analyzovať na „podpise” motora a jej závažnosť možno vyhodnotiť podľa veľkosti magnítúd na postranných pásmach. [16]

Použitelnosť Fourierovej transformácie za účelom identifikácie porúch je obmedzená na stacionárne signály. Umožňuje zistiť poruchy na konkrétnych frekvenciách, ale stráca sa informácia v časovej oblasti. Vlnkovými transformáciami je možné lokalizovať jednotlivé udalosti v získanom spektre a tým vykonať časovo-frekvenčnú analýzu. Výraznou výhodou vlnkových transformácií oproti klasickej FFT je to, že v neštandardných podmienkach, ako napr. pri výraznom kolísaní napájacieho napätia, nekonštantnej prevádzkovej rýchlosti alebo premenlivej záťaži poskytuje dôveryhodnejšiu analýzu spektra. Výsledok analýzy v ustálenom stave použitím FFT by mohol byť skreslený a nepresný, pretože niektoré blízke frekvencie používané napr. na identifikáciu poruchy sa môžu zobrazovať aj vtedy, keď je motor plne funkčný. To môže viesť k zbytočným zmätkom a nesprávnej interpretácii výsledkov diagnostiky motora. [17]

Metódou MCSA je možné detekovať široké spektrum porúch. Existuje veľké množstvo publikácií, ktoré potvrdili prítomnosť poruchy použitím metódy MCSA. Aj preto sa v súčasnosti táto metóda čoraz viac dostáva do povedomia.

1.10.1 IPSA – Analýza okamžitého prejavu na výkone motora

Analýza okamžitého prejavu na výkone motora IPSA (po angl. *Instantaneous Power Signature Analysis*) je metóda, ktorá okrem napájacieho prúdu vyžaduje meranie napájacieho napätia. Okamžitý výkon je potom daný súčinom týchto zmeraných veličín: $p(t) = i(t)u(t)$. Informácie o okamžitom výkone poskytujú spoľahlivejšiu analýzu ako MCSA. Získaný signál je menej zašumený a má lepší dynamický rozsah harmonických zložiek pri absencii hlavnej napájacej zložky v spektre, viď. Obr 1.8. [16]



Obr. 1.8: Porovnanie výkonového spektra funkčného motora metódou MCSA (sledovanie prúdu) a IPSA (sledovanie výkonu). Obrázok prevzatý a upravený z [16].

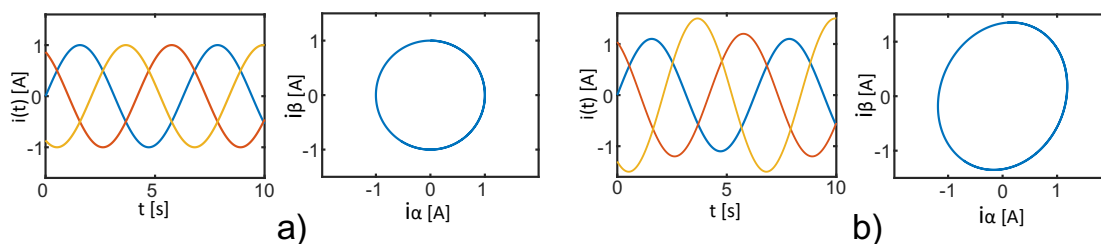
1.10.2 Analýza prejavu prúdov s Parkovým vektorom

Analýza pomocou Parkovho vektora je založená na rovnakom princípe ako MCSA, ale líši sa v snímaní všetkých troch fáz napájacieho prúdu. Tie sú Clarkovej transformáciou prepočítané do α - β súradníc a následne vykreslené. Pri ideálnych podmienkach (fázové prúdy sú sínusové bez ďalších harmonických zložiek) by mal mať Parkov vektor dve zložky:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= \frac{\sqrt{6}}{2} i_M \sin(\omega t) \\ i_{\beta} &= \frac{\sqrt{6}}{2} i_M \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (1.5)$$

kde i_M je maximálna hodnota napájacieho prúdu, ω je uhlová rýchlosť napájacieho zdroja a t je časová premenná. Grafické znázornenie (Lissajousova krivka [15]) je ideálny kruh so súradnicami v počiatku a s priemerom rovnajúcemu sa prúdu statora v aktuálnom stave motora (Obr. 1.9a). To dáva zmysel, pretože Clarkovej transformácia prepočíta trojfázové prúdy na jeden rotujúci konštantný vektor s dvomi zložkami: i_{α} a i_{β} . Pri abnormálnych podmienkach rovnice (1.5) neplatia a kruh je podľa vážnosti poruchy deformovaný napr. na elipsovité tvar. (Obr. 1.9b – je použitý signál s rozdielnymi amplitúdami, ktoré môžu predstavovať napr. nerovnováhu prúdov statora vo vinutiach.) Kruh je skreslený a na základe tvaru je možné vyhodnotiť stav motora. [15]

Základná podstata metódy sledovania Parkovho vektora spočíva v identifikácii vykreslených vzorov – ich tvaru a hrúbky, z čoho je možné posudzovať stav motora. Existuje niekoľko výskumov, ktoré úspešne aplikovali túto metódu. Za zmienku stojí vedecká štúdia [18], podľa ktorej táto metóda dokázala identifikovať vážnosť poruchy rozbitých tyčí rotora, alebo [19], kde grafické vyhodnotenie vzorov pomohlo určiť vyskratovanú fázu motora.



Obr. 1.9: Metóda založená na sledovaní Parkovho vektora: Zobrazenie trojfázového signálu a jeho grafická reprezentácia v α - β súradniciach

1.10.3 EPVA – Rozšírená analýza sledujúca Parkov vektor

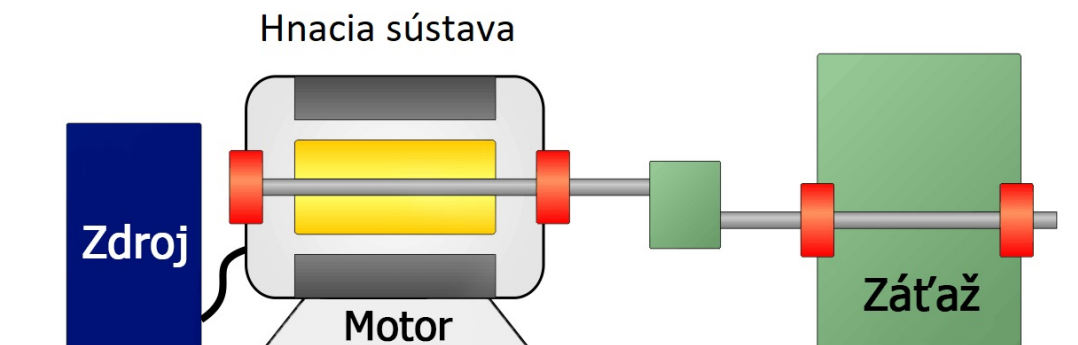
Použitie tohto základného prístupu býva často nevyhovujúce pre diagnostiku, lebo signál často zahŕňa šum. Ďalej je nutná komplexná databáza vzorov pre každú poruchu a poruchy je obtiažne medzi sebou rozlíšiť len cez zmeny skreslenia. Okrem toho získané útvary sú deformované asymetriami motora z výroby (rozdielnymi impedanciami vinutia, nedokonalou vzduchovou medzerou, povrchovými nerovnosťami). [15] Preto je táto metóda rozšírená o možnosť pozorovania spektra modulu Parkovho vektora – metódou EPVA (Rozšírená analýza sledujúca Parkov vektor – z angl. *Enhanced Park's Vector Approach*).

Táto metóda kombinuje jednoduchosť predchádzajúceho postupu a schopnosť spektrálnej analýzy s podrobnejším náhľadom. Pri porovnaní s MCSA sa charakteristiky poruchy výraznejšie zobrazujú v spektre vďaka automatickému vylúčeniu hlavnej zložky na napájacej frekvencii. Navyše berieme do úvahy všetky trojfázové prúdy, takže EPVA poskytuje užitočnejšie spektrum než spektrálna analýza jedného prúdu podľa MCSA. [20]

Na skúmanie potenciálnych závad sa kombinujú metódy prediktívnej diagnostiky podľa ich vhodnosti pre konkrétnu poruchu. Obr. 1.10 doporučuje najvhodnejšie metódy pre konkrétnu časť mechatronickej sústavy. Niektoré metódy prediktívnej diagnostiky z Obr. 1.10 neboli predstavené, no stoja za zmienku.

Monitorovanie čiastočných výbojov (*Partial Discharge Analysis*) sleduje prejavy a následky výbojovej činnosti v izolačných materiáloch. Zo získaných dát je možné určiť ich rozsah alebo miesto ich vzniku.

Monitorovanie parametrov kvality napätia (*Power Quality*) je metóda založená na sledovaní časových priebehov elektrických veličín ako napätie, prúdy, energie, činný a jalový výkon. Sleduje zvýšenie, poklesy, prerušenia napájacieho napätia a na tom základe sa vykonáva analýza.



Zdroj	Power Quality	EPVA (Voltage)	
Mech. nerovnováha a nevyrovnanosť	MCSA	Vibration	EPVA
Izolačné chyby	Partial Discharge	EPVA	
Elektrická nevyrovnanosť statora	EPVA	MCSA	Power Quality
Rozbité tyče rotora	MCSA	EPVA and IPSA	
Ložiskové závady	Vibration	Wavelet on Current	MCSA, EPVA and IPSA
Väzbový člen a závady na záťaži	Vibration	MCSA, EPVA and IPSA	

Významnosť: Vysoká Stredná Nízka

Obr. 1.10: Porovnanie vhodnosti metód prediktívnej diagnostiky pri konkrétnej poruche. Obrázok prevzatý a upravený z [10].

2 Model PMSM a úvod do modelovania mechatronických systémov

2.1 MATLAB & Simulink

Ako vývojové prostredie je použitý softvér MATLAB & Simulink od spoločnosti *MathWorks*. Softvér umožňuje prácu s matematickými operáciami, vykresľovanie funkcií, implementáciu rôznych algoritmov a vytváranie používateľských rozhraní. Je primárne využívaný na numerické a maticové výpočty, iteratívnu analýzu a na návrh procesov. Obsahuje interaktívny workspace, príkazový editor na vytváranie okamžitých skriptov, ktorý je možné skombinovať s textovým skriptom. Základnú verziu softvéru MATLAB je možné podľa potreby rozšíriť o toolboxy. [21]

Simulink je doplnkové rozšírenie k softvéru MATLAB. Ide o grafické programovacie prostredie pre modelovanie, simuláciu a analýzu dynamických systémov. Základným prvkom sú rôzne typy blokov, ktoré sa nachádzajú v knižnici. K vytvoreniu vlastného modelu je používaná tzv. *drag and drop* technika. Tieto blokové komponenty sa navzájom prepájajú. Simulink sa využíva na testovanie, simuláciu a overenie reálnych vstavaných systémov. Tak MATLAB, ako aj Simulink je možné doplniť o doplnkové rozšírenia. Jedným z nich je aj Simscape, ktorý sa bude využívať v tejto práci. [22]

2.2 Simscape a základy fyzikálneho modelovania

Simscape umožňuje vytvárať a simulovať fyzikálne modely procesov v prostredí Simulink. Na rozdiel od klasického modelovania v Simulinku, Simscape využíva fyzikálne dátové toky, ktorými sú poprepájané funkčné bloky. Použité bloky reprezentujú skutočné komponenty v rôznych fyzikálnych doménach (Obr. 2.1a), ako napr. motory, prevodovky, pumpy, ventily atď. Jednotlivé domény sú farebne odlíšené. Prvky majú fyzikálne brány (prípojnú miestu), medzi ktorými po prepojení dochádza k interakcii a k výmene energie. Smer toku dát nemá pevne určený smer, je daný ich fyzikálnym spojením. Funkčnosť prepojenia medzi prvkami je analogické ako v reálnom svete. Inak povedané: Ak sa dajú spojiť v skutočnosti, ich modely je možné spojiť aj v Simscape. [23]

Tok energie, podľa ktorého sa riadia všetky reálne procesy, je definovaný dvoma dátovými premennými: „cez“ (*through variable*) a „medzi“ (*across variable*). Tieto premenné tvoria základnú štruktúru matematického modelu daného prvku. Veľkosť premennej „cez“ je meraná meracím prístrojom v sérii, zatiaľ čo veľkosť „medzi“ je meraná meracím prístrojom zapojeným paralelne. V každej fyzikálnej doméne

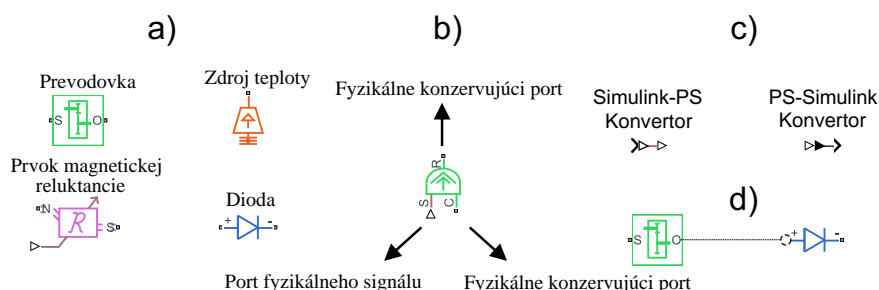
(či už napr. v magnetickej, elektrickej, plynovej, mechanicko-rotačnom/translačnom pohybe atď.) sa používajú obe premenné ako základný popis systému. Ich súčin často dáva veľkosť energie. Typickými dvojicami sú napr. prúd a napätie v elektrickej doméne, sila a rýchlosť v mechanicko-translačných systémoch, krútiaci moment a uhlová rýchlosť. [23]

Simscape bloky používajú dva základné typy prípojných miest: port fyzikálneho signálu (*physical signal port*), ktorý nesie signál medzi blokmi, a fyzikálny konzervujúci port (*physical conserving port*), ktorý spája rovnaké prípojné miesta, nesie fyzikálne premenné a reprezentuje výmenu energetických tokov. Oba typy portov sú znázornené na Obr. 2.1b. [23]

Namodelovaný systém možno rozšíriť o doplnkové nastavenia po rozkliknutí na vybraný blok. Je možné pridať napr. tepelné straty pri trení, dynamicky meniť moment zotrvačnosti, nastaviť poruchy atď. za predpokladu, že porty s charakteristikou premennou zostanú rovnaké. [23]

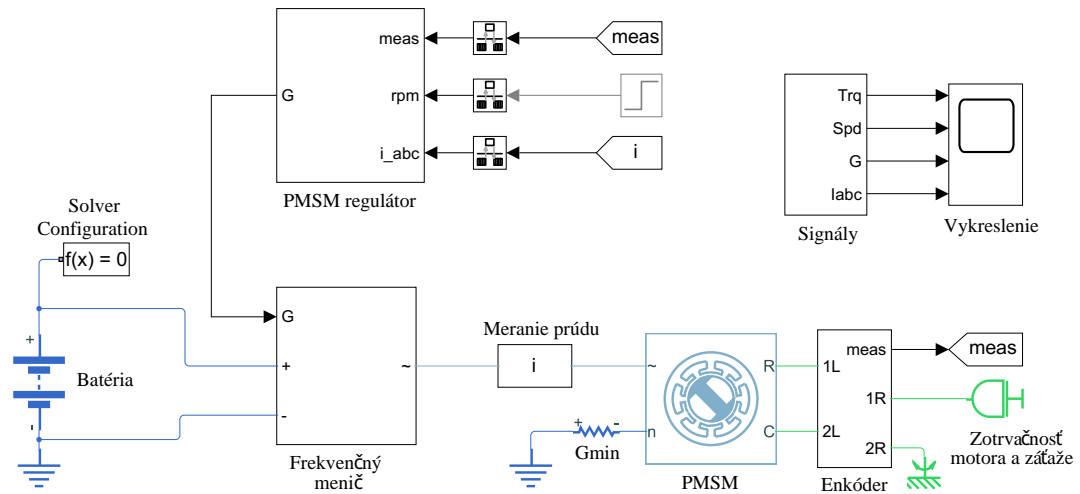
Veľkou výhodou je využívanie možností Simulinku jednoduchým prepojením. Ako už bolo povedané, Simscape používa fyzické signály namiesto bežných dátových tokov. Konvertormi Simulink-PS a PS-Simulink je možné prepojiť obe prostredia. Keďže dátový tok Simulinku neobsahuje fyzikálny signál, je potrebné v konvertore zadať jednotku fyzikálnej veličiny. Používané konvertory sú znázornené na Obr. 2.1c. [23]

Je dôležité spomenúť, že prepojenie medzi rôznymi doménami nie je možné, pokiaľ prvky na seba nenadväzujú (Obr. 2.1d). Pre účely tejto práce boli k základnej verzii Simscape pridané doplnky Simscape Electrical™ a Simscape Driveline™, ktoré pridávajú komplexnejšie prvky. Okrem všetkých spomenutých benefitov Simscape poskytuje techniku pre simulovanie a analýzu fyzikálnych systémov. Simscape predstavuje celkom nový prístup modelovania, ktorý bude ďalej využívaný za účelom lepšej simulácie poruchových stavov v synchronnom motore.



Obr. 2.1: Základy Simscape: V a) je široký výber komponentov z rôznych domén (prevodovka, dióda, prvok variabilnej reluktancie, zdroj teploty). V b) sú dva typy prípojných miest. V c) sú konvertory na prepojenie Simulink a Simscape. V d) je znázornené, že priame prepojenie medzi dvomi nie je možné.

2.3 Popis základného modelu PMSM v Simulinku



Trojfázový PMSM pohon

Obr. 2.2: Schéma PMSM pohonu v Simscape [24]

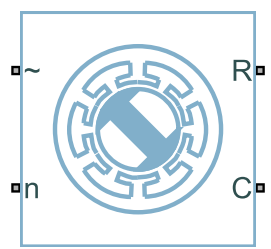
Za účelom oboznámenia sa s problematikou monitorovania stavu mechatronického systému so synchronným motorom je použitý predpripravený simulačný model od Mathworks. Pretože je dôležité mu správne porozumieť, nasledujúce podkapitoly sa budú výhradne venovať jednotlivým častiam simulácie. Podrobnejší popis a cesta k modelu je v [24]. Simulačný model (Obr. 2.2) vychádza zo základnej schémy vektorového riadenia motora. Tvorí ho synchronný motor s permanentnými magnetmi (*Permanent Magnet Synchronous Motor*), jeho riadiaca štruktúra v subsystéme *PMSM controller*, ďalej subsystém meniča (*Three-phase inverter*) a nakoniec namodelovaný enkóder v subsystéme *Encoder*. Do modelu je ešte zapojený subsystém snímania trojfázového prúdu (*Sensing Currents*) a možnosť grafického zobrazenia výsledkov cez osciloskop. Každá simulácia s fyzikálnymi blokmi a tokmi veličín musí obsahovať blok *Solver Configuration*, ktorý je pripojený na tok fyzikálneho signálu. Tento blok nastaví parametre riešenia simulácie.

2.3.1 Model PMSM

Matematický model synchronného motora s permanentnými magnetmi so sínusovým distribuovaným magnetickým tokom a vinutím zapojeným do hviezdy je namodelovaný v bloku PMSM z knižnice Simscape Electrical™. Jeho nastaviteľné parametre fyzikálnych veličín zostali nezmenené, v základnom prevedení má motor dve elektrické prípojné miesta (n – *Neutral Phase* a \sim – *Three-phase Port*) a dve mechanické

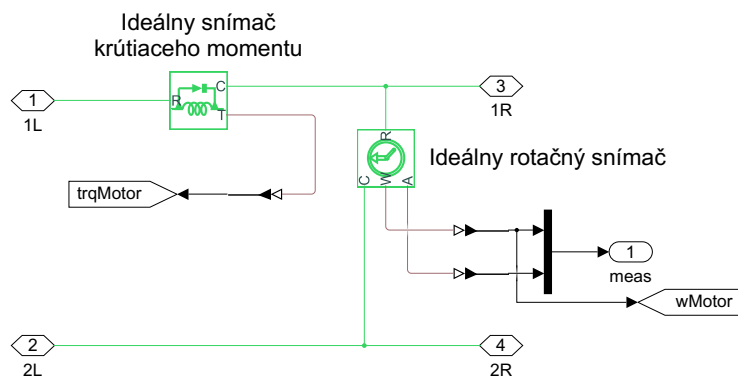
prípojných miest (R – *Motor Rotor* a C – *Motor Case*). Trojfázové napájanie je privádzané z frekvenčného meniča, nulová fáza je pripojená k zemi. K motoru v elektrickej časti je ešte pripojený rezistor G_{min} . Ten pridáva malú vodivosť zemi, čím zlepšuje numerické vlastnosti modelu počas simulácie. Port R reprezentuje mechanické prípojnú miesto spojené s rotorom a pre prípojnú miesto C je ako referenčný bod nastavený pevný rám motora. Blok modelu PMSM a jeho hlavné parametre sú zobrazené v Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Nastavené parametre bloku PMSM v simuláciách

PARAMETER	NASTAVENIE	 <p>PMSM</p>
Typ zapojenia	do hviezdy	
Počet pólových dvojíc	6	
Magnetický tok (Wb)	0,03	
Pozdĺžna indukčnosť L_d (H)	0,0002	
Priečna indukčnosť L_q (H)	0,0002	
Odpor vinutia statora R_s (Ω)	0,013	
Nulová sekvencia	vynechaná	

2.3.2 Model Enkódera

Keďže Simscape neposkytuje priamo v knižnici blok enkódera, snímač je namodelovaný v subsysteme (Obr. 2.3) blokmi: ideálny rotačný snímač (*Ideal Rotational Sensor*) a ideálny snímač krútiaceho momentu (*Ideal Torque Sensor*). Prvým snímačom je získaná poloha (natočenie) a uhlová rýchlosť rotora – veličiny potrebné pre algoritmus vektorového riadenia. Druhý snímač sníma veľkosť generovaného krútiaceho momentu PMSM.

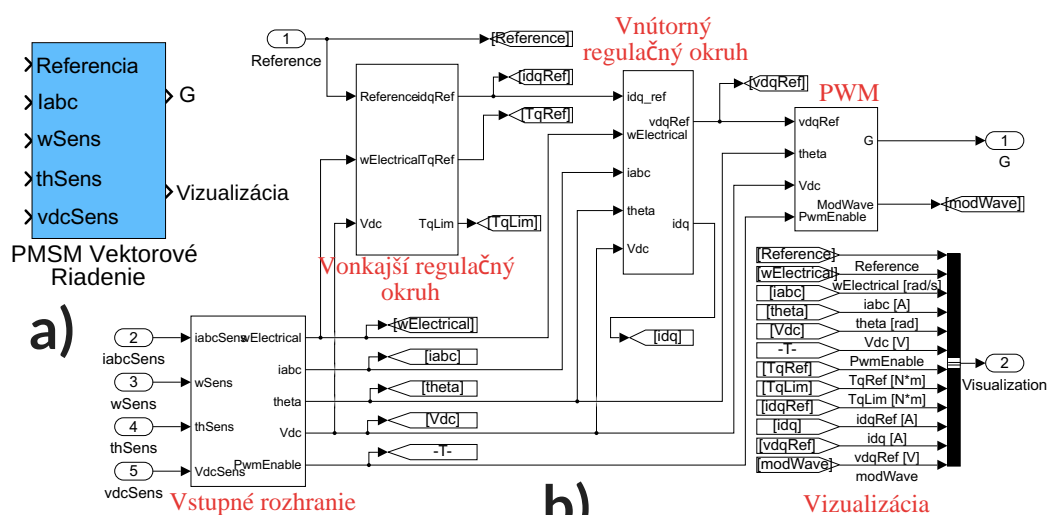


Obr. 2.3: Model enkódera v Simscape

Do subsystému vstupujú dva fyzikálne signály z mechanickej časti. Analogicky jeden signál je spojený s rotačnou časťou motora a druhý s pevnou časťou motora. Snímač sa nachádza na hriadeľi, kde zotrvačnosť hriadeľa je reprezentovaná blokom ideálnej rotačnej zotrvačnosti (*Motor & Load Inertia*). Ako referenčný bod rotačného pohybu je nastavená pevná zem.

2.3.3 Blok vektorového riadenia

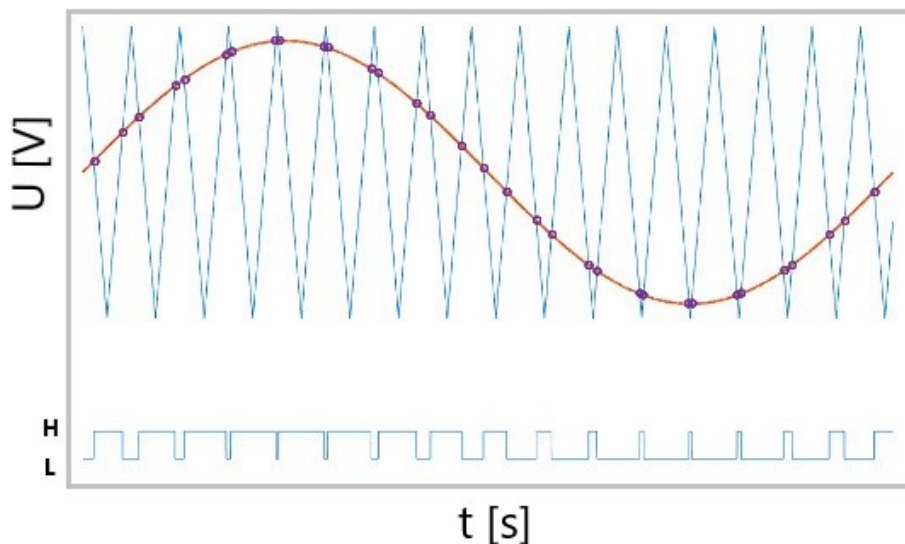
Model vektorového riadenia je vložený do subsystému a vychádza zo základnej schémy podľa (Obr. 1.5) s malými modifikáciami. Jeho teoretický princíp je popísaný v kapitole 1.4. Ide o komplexný problém s veľkým počtom vnorených subsystémov a poprepájaných blokov. Preto je pre jednoduchosť celý algoritmus vopred namodelovaný v bloku *PMSM Field-Oriented Control* z knižnice Simscape Electrical™ (Obr. 2.4a) s jednoduchou možnosťou zmeny parametrov. Základným predpokladom použitia bloku vektorového riadenia je nutná znalosť parametrov a veličín motora, t. j. poloha rotora, uhlová rýchlosť, nominálne napájacie napätie batérie, veľkosť fázových prúdov statora a veľkosť referenčných hodnôt. Všetky tieto parametre vstupujú do subsystému spolu so žiadanou skokovou zmenou otáčok. Výstupom bloku sú aktuálne veľkosti parametrov pre vizualizáciu a hradlové pulzy, ktoré určujú zmeny prepínania bipolárnych tranzistorov s izolovaným hradlom (IGBT – *Insulated-gate bipolar transistor*) vo frekvenčnom meniči. Blok vektorového riadenia sa skladá zo subsystémov: Vstupné rozhranie (predpríprava parametrov), vonkajší a vnútorný regulačný obvod a blok pulznej šírkovj modulácie (Obr. 2.4b).



Obr. 2.4: V a) je zobrazený blok vektorového riadenia PMSM, v b) je zobrazená jeho samotná štruktúra v Simulinku

Vektorové riadenie PMSM je nastavené v režime riadenia rýchlosti otáčok. Tento režim vyžaduje kaskádnú reguláciu otáčok vo vonkajšom spätnoväzbovom obvode a reguláciu krútiaceho momentu vo vnútorných spätnoväzbových obvodoch. Ako referenčná hodnota otáčok nevstupuje žiadaná skoková zmena, ale signál obmedzený maximálnym možným zrýchlením motora blokom *Rate Limiter*. Rozdiel referenčných a okamžitých otáčok vstupuje ako odchýlka do PI regulátora. Výstup regulátora vo forme akčného zásahu je použitý ako referenčná hodnota krútiaceho momentu pre vnútorné regulačné obvody. Na základe tejto hodnoty blok generátor referenčných prúdov (*PMSM Current Reference Generator*) napájaný z batérie meniča určí referenčné prúdy v d-q súradniciach. Rozdiel referenčných hodnôt a namera-
ných trojfázových prúdov v statore po transformáciách sú odchýlky, ktoré vstupujú do samostatných PI regulátorov. Tie regulujú veľkosť toku prúdov i_d a i_q . Model je doplnený o ochranné a pomocné funkcie ako sú ochrana proti pretečeniu integrátorov (*Anti-windup*), ochrana proti saturácii a možnosť doprednej vstupnej väzby. Celý blok pracuje s periódou vzorkovania 50 μ s. Parametre vektorového riadenia sa nemenili, ich veľkosť a podrobnejší rozbor bloku je v [25].

Do subsystemu pulznej šírkovej modulácie vstupuje veľkosť napäťového akčného zásahu. Inverznou Parkovou a inverznou Clarkovej transformáciou je získané trojfázové napätie. Na generovanie signálu pulznej šírkovej modulácie je zvolená metóda SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation* – Sínusová pulzná šírková modulácia). Cieľom je získať napäťový signál z Obr. 2.5, ktorého šírka pulzov sa sínusovo mení.



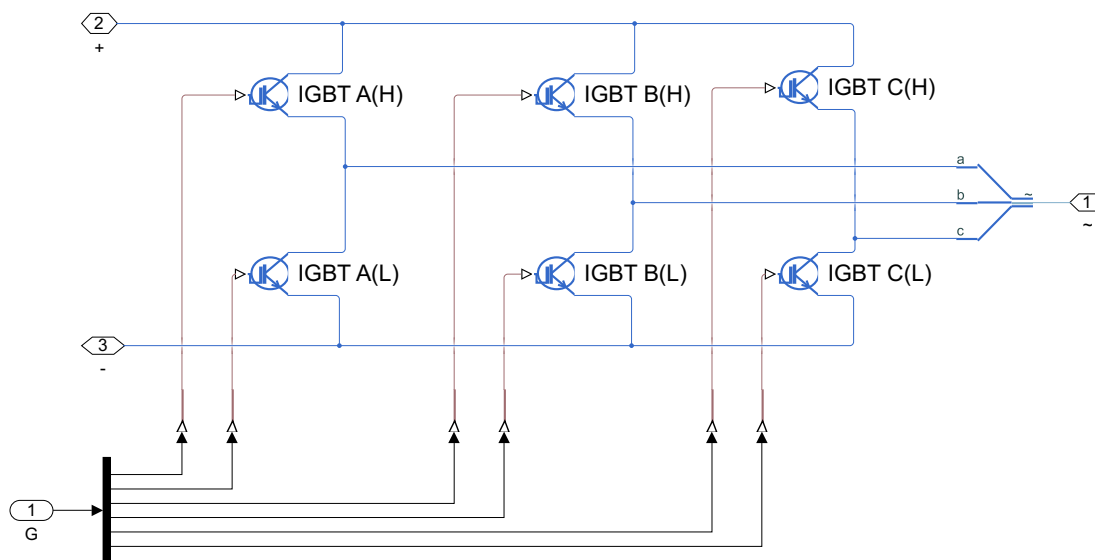
Obr. 2.5: Grafické znázornenie získania SPWM signálu. Obrázok prevzatý a upravený z [26].

Referenčný modulačný sínusový signál (trojfázové napätie) je porovnaný s generovaným trojuholníkovým nosným signálom. Na určenie doby medzi vysokou úrovňou (H) a nízkou úrovňou (L) je použitá metóda *Sampling mode: natural*, ktorá vzorkuje signál len pri priesečníkoch modulačného a nosného signálu. Výstupom sú pulzné priebehy s modulovanou šírkou, ktoré určujú spínacie správanie (doby prepínania) v pripojenom výkonovom frekvenčnom meniči. [26]

2.3.4 Model Frekvenčného meniča

Model ideálneho frekvenčného meniča (Obr. 2.6) s vlastnosťami, ktoré sa typicky používajú v hybridných vozidlách, je vložený do subsystemu a je priamo napájaný 48 V batériou. Skladá sa zo šiestich IGBT. Pre každú fázu sa používajú dva IGBT. Jeden spína nízku úroveň a druhý vysokú úroveň. Frekvenčným meničom je jednosmerné napätie prevedené na striedavé napätie, ktorým je možné napájať PMSM. Táto transformácia môže byť jednoducho zdôvodnená. Keďže motor môže byť v teoretickej rovine reprezentovaný ako RL záťaž, fyzikálne vlastnosti cievky neumožňujú náhle zmeny prúdu, a preto priebeh prúdu je pozvoľný. (Pri sínusovej veľkosti šírky pulzov je priebeh prúdov sínusový.) Takto je možné dodávať do PMSM trojfázový sínusový prúd.

Cieľom tejto práce nie je ani realizácia PMSM a jeho riadiaceho algoritmu FOC, ani práca s výkonovými polovodičovými prvkami. Preto sa v nej nebude venovať pozornosť ich matematickým a fyzikálnym princípom.



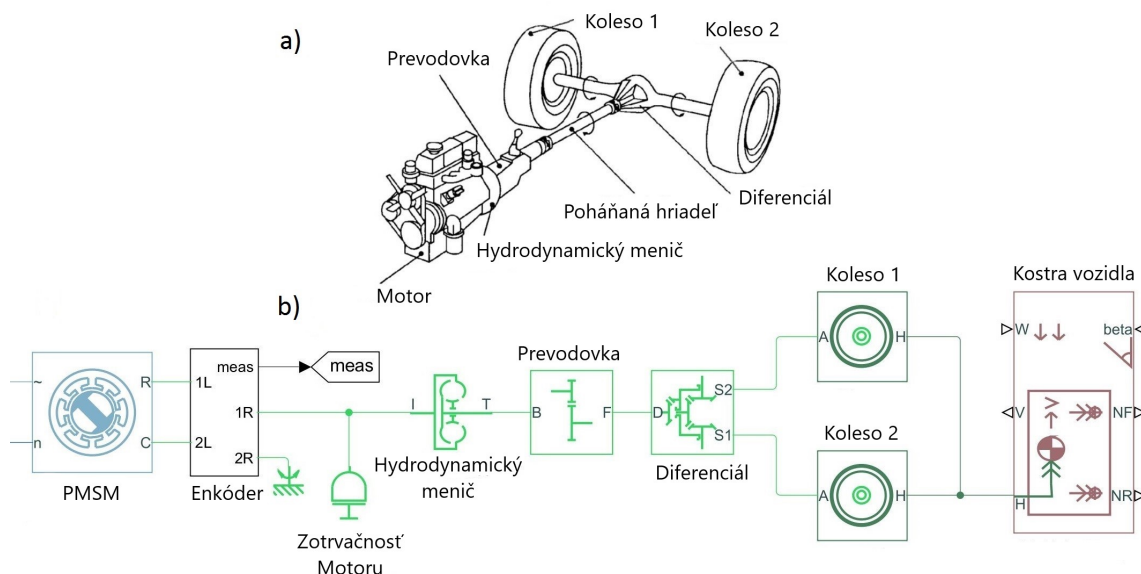
Obr. 2.6: Model frekvenčného meniča v Simscape

2.4 Modelovanie mechatronických systémov

Vzorová simulácia predstavuje len samotný PMSM a je potrebné ju rozšíriť o ďalšie mechanické prvky. Motor býva súčasťou hnacích sústav – súboru zariadení, ktoré zabezpečujú tok energie od motora až po pracovné zariadenie. Príkladom využitia môže byť hnacia sústava elektrického hybridného vozidla s mechanickými prvkami ako napr. menič momentu, prevodovka, diferenciál, kolesá a ovládacie prvky (Obr. 2.7a).

Pomocou rozšírenia Simscape Driveline™ je možné pridávať mechanické bloky z knižnice a ich prepojením efektívne simulovať reálne mechanické sústavy prenášajúce translačný a rotačný pohyb. Ako praktická ukážka posluží vyššie spomínaná pohonná jednotka automobilu v zjednodušenom prevedení. Jej model je zobrazený na Obr. 2.7b. Generovaný točivý moment je hydrodynamickým meničom (*Torque Converter*) prenášaný na hnací hriadeľ. Jednoduchou prevodovkou (*Simple Gear*) je moment prispôbený požadovanej charakteristike pohybu hnaného hriadeľa. Blokom diferenciál (*Differential*) sú rozdelené otáčky a krútiaci moment na výstupné hriadele, ku ktorým sú pripojené kolesá auta (*Tire*). Kolesá vozidla sú nakoniec spojené s blokom zadnej nápravy, ktorý reprezentuje jeho pohybovú dynamiku (*Vehicle Body*).

Simscape ďalej umožňuje sledovanie veličín jednotlivých blokov, čím sa výrazne zefektívni analýza mechatronického systému. V tejto práci bude využívaný práve tento prístup modelovania reálnych systémov.



Obr. 2.7: Schéma jednoduchšej pohonnej jednotky automobilu a jej model v Simscape

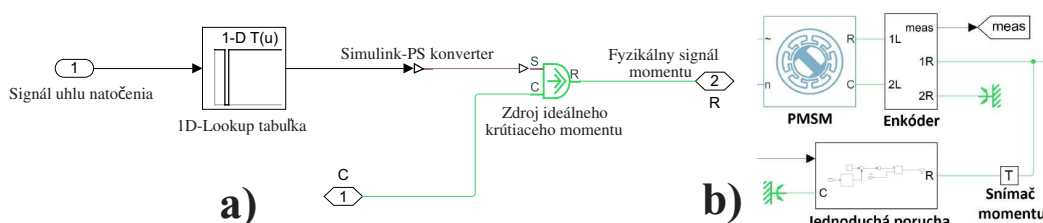
2.5 Modelovanie jednoduchých mechanických porúch

Pre účely monitorovania stavu mechatronických systémov je vhodné do modelu zakomponovať nežiadúce stavy. Keďže Simulink a použité rozšírenia neobsahujú priamo poruchové bloky, voľba správnej stratégie riešenia je kľúčová. Cieľom bude skúmanie poruchy presného typu v konkrétnej časti systému za týchto obmedzujúcich podmienok: predpoklad pôsobenia práve jednej poruchy, okolité prostredie nebude mať žiaden vplyv, výsledky nebudú overené na reálnom mechatronickom systéme, model poruchy nemusí odpovedať realite a dôraz na výsledky poruchy bude prevažovať nad fyzikálnou realizovateľnosťou systému a nad kvalitou regulácie. Týmto sa problematika modelovania poruchy výrazne zjednoduší a ich hlavná podstata sa stále zachová.

Ako už bolo spomenuté v kapitole 1.6, poruchy môžu byť buď mechanického, alebo elektrického charakteru. Táto práca sa bude venovať výhradne mechanickým poruchám. Tu je na výber niekoľko možných stratégií. Porucha sa dá vyjadriť priamo blokom z knižnice, napr. obmedzením pohybu. Niektoré bloky ďalej ponúkajú cez nastaviteľné parametre možnosť implementácie jednoduchých porúch, ako napr. trecie straty, tepelné straty, obmedzenie pohybu atď. V prípade, že porucha sa dá vyjadriť momentovou závislosťou, potom jej implementácia do modelu je jednoduchá: Blok – ideálny zdroj krútiaceho momentu (*Ideal Torque Source*) bude generovať moment, ktorý sa pripojí do modelu.

Príkladom tohto prístupu môže byť Obr. 2.8, kde signál generovaného poruchového momentu závisí od výstupného signálu z bloku 1D-lookup tabuľka (*1D-Lookup Table*). Blok 1D-lookup tabuľky má pevne zadefinovaný priebeh, ktorý závisí od uhla natočenia rotora. Konkrétne táto varianta bloku generuje skokovú zmenu signálu pri uhle natočenia $\theta = \langle 55^\circ; 65^\circ \rangle$.

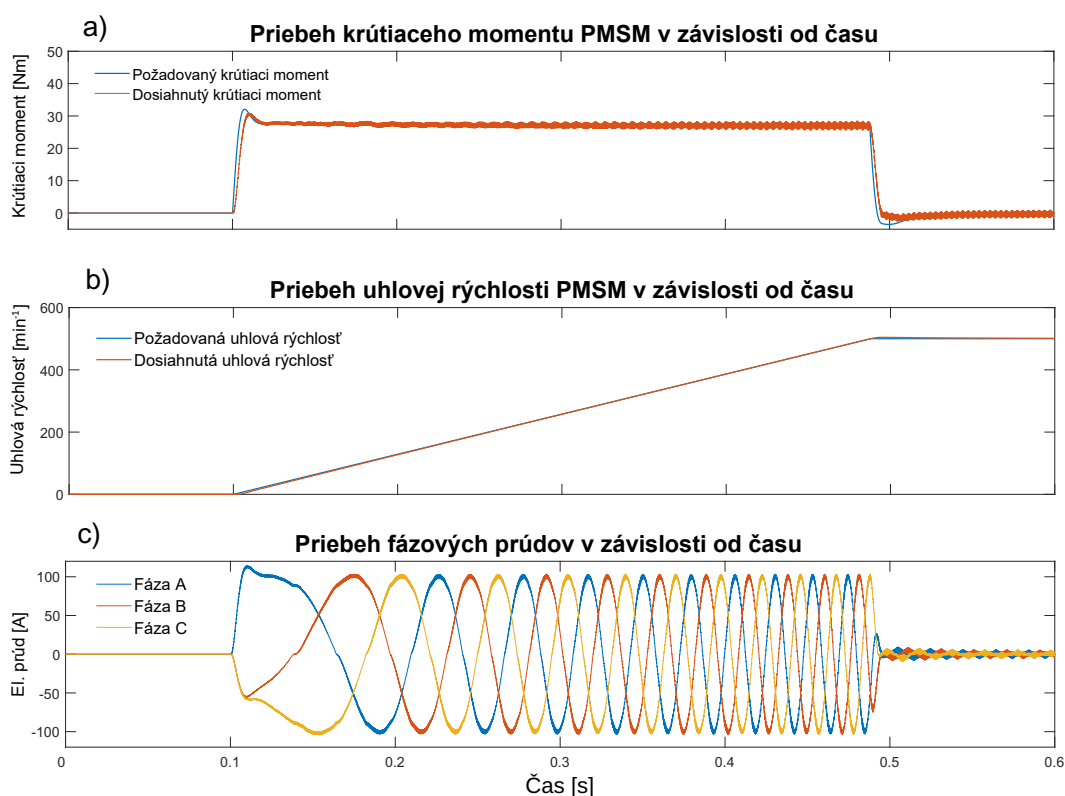
Simulačný model s poruchou bude ďalej analyzovaný vhodne zvoleným prístupom prediktívnej diagnostiky. Jej implementácia a vyhodnotenie stavu mechatronickej sústavy zvolenou metódou bude hlavným cieľom praktickej časti tejto práce.



Obr. 2.8: Príklad jednoduchej poruchy a jej pripojenie do modelu v Simulinku. V a) je zobrazená namodelovaná jednoduchá porucha a v b) je zobrazený detail schémy PMSM pohonu, do ktorého je pripojený subsystém jednoduchej poruchy.

2.6 Simulácia PMSM pohonu

Doba simulácie je nastavená na 0,6 s. Počas tohto času dochádza k rozbehu PMSM na požadované otáčky. V čase 0,1 s prichádza skoková zmena požadovaných otáčok na 500 min^{-1} . Skokový signál je obmedzený maximálnym možným zrýchlením PMSM. Nárast otáčok generuje krútiaci moment, ktorý priamoúmerne závisí od veľkosti trojfázového napájacieho prúdu. Po dosiahnutí požadovaných otáčok motor nie je nútený generovať moment, keďže na výstupnom hriadeľi nie je pripojená záťaž, ktorá by brzdila sústavu. Výsledky simulácie je možné vidieť na Obr. 2.9. Z hľadiska zadania práce výsledná regulácia otáčok PMSM nie je zaujímavá, za zmienku však stojí rýchle vyregulovanie otáčok bez viditeľného prekmitu a trvalej regulačnej odchýlky. Výsledný točivý moment má mierny prekmit. PMSM pohon je dimenzovaný na maximálny točivý moment okolo 41 Nm.



Obr. 2.9: Výsledky simulácie PMSM: V a) je vidieť priebeh požadovaného a skutočného točivého momentu PMSM, v b) je zobrazený priebeh požadovaných a dosiahnutých otáčok PMSM a v c) priebeh trojfázových napájacích prúdov.

V nasledujúcich kapitolách sa bude podrobne venovať pozornosť niektorým mechanickým poruchovým stavom, s ktorými je možné sa bežne stretnúť v reálnom chode mechatronického systému. Ku každej poruche bude popísaný jej navrhnutý model, návrh riešenia diagnostiky a výsledky simulácií.

3 Drhnúci efekt v mechatronickom systéme

3.1 Drhnutie motora

Základná myšlienka poruchového stavu je založená na trení vnútorných kovových častí proti sebe. Konkrétne dochádza k jemným kontaktom statorovej a rotorovej časti. Ďalej sa drhnutie zvyčajne prejaví ako sekundárny účinok poruchy mechanickej nerovnováhy alebo nevyrovnanosti, pri opotrebovaní ložísk, zlej montáži, malej radiálnej vzdialenosti medzi rotujúcim hriadeľom a púzdom atď. Tieto poruchy výrazne zvyšujú amplitúdu vibrácií. Zvýšené namáhanie na relatívne vysokých frekvenciách zase spôsobuje odklon hriadeľa z centrovanej pozície. Pri prekročení povolených hodnôt dochádza k mechanickým dotykom častí a nakoniec k ich drhnutiu. Ďalším významom môže byť nečakané zadrhnutie v pohybe motora alebo výsledok nedostatku maziva vo valivých prvkoch. Efekt drhnutia má sklony chaotického pohybu. Spôsobuje prehriatie a následné opotrebovanie. Je jasné, že drhnutie sa prejavuje na širokej škále mechanických častí v rôznych podobách, a preto je dôležité venovať tejto problematike zvýšenú pozornosť.

3.2 Model mechatronického systému s drhnutím

Cielom je implementovať drhnúci efekt do predpripraveného modelu zobrazeného na Obr. 2.2. Zatiaľ čo nevyváženosti a nevyrovnanosti sa dajú pomerne ľahko modelovať, analytické modely a implementácia iných efektov je podstatne zložitejšia. A tak otázkou zostáva, akým spôsobom sa dá pozeráť na problematiku drhnutia pri docielení zjednodušenia modelu poruchy na takú úroveň, že podstata poruchy zostáva zachovaná a zároveň jej implementácia nie je obmedzená dostupným softvérom (kompromis medzi realizovateľnosťou poruchy pri zachovaní jej hlavnej podstaty).

Návrh poruchového stavu je založený na simulovaní efektu drhnutia na hnacom hriadeľi. Zvolený jav si možno predstaviť ako kus plechu alebo inej odpadnutej časti na hriadeľi, o ktorú sa jemne trie pevný rám. Z fyzikálneho hľadiska ide o brzdný moment, ktorý pôsobí proti generovanému točivému momentu.

Základná myšlienka návrhu modelu poruchy drhnutia vychádza z Obr. 2.8. Poruchový signál je odhadnutý ako pulzujúci signál, ktorý je závislý od uhla natočenia rotora. Skokové maximálne hodnoty dosahuje vo vybratom sektore výskytu poruchy (dotyk rámu a plechu na hriadeľi). Okrem časovo závislého momentu pôsobí konštantný moment a reprezentuje trecie straty. Konvertorom *Simulink-PS Converter* je signálu daná fyzikálna podstata. Signál vstupuje ako vstupná hodnota do bloku *Ideal Torque Source*, ktorý je zdrojom mechanickej energie. Tá generuje moment

proporcionálny vstupnému signálu. Moment poruchy je potom pripojený k modelu riadenia PMSM (Obr. 2.8b).

Pôvodný model po dosiahnutí požadovaných otáčok nie je nútený generovať točivý moment, pretože neexistuje nič na výstupe, čo by systém brzdilo (hriadeľ sa bude trvalo točiť konštatnými dosiahnutými otáčkami). Preto je na výstupe namodelovaná jednoduchá záťaž v podobe konštantného brzdného momentu. Jeho veľkosť sa lineárne mení v závislosti od rýchlosti otáčania motora. Maximálna veľkosť tohto momentu pri dosiahnutí požadovaných otáčok je približne 20 % maximálneho generovaného momentu motora. Pre účely snímania momentov sú do modelu pridané subsystémy snímačov točivých momentov.

3.3 Implementácia prediktívnej diagnostiky do modelu s efektom drhnutia

Namodelovaná porucha drhnutia je ďalej analyzovaná vhodne zvoleným prístupom prediktívnej diagnostiky. Cieľom bude pomaly zhoršovať stav systému postupným zvyšovaním pôsobiacej poruchy. Hlavná myšlienka návrhu prediktívnej diagnostiky bude spočívať v pravidelnom meraní prúdov statora, uložení nameraných dát a dávkového vyhodnotenia naprogramovaným algoritmom. Získané výsledky sa budú kvantitatívne porovnávať až do bodu, v ktorom bude možné prehlásiť, že motor nebude schopný ďalej plniť požadovanú funkciu. K tomu bude použitá metóda založená na sledovaní trojfázových napájacích prúdov pomocou Parkovho vektora. Jej teoretický princíp je popísaný v kapitole 1.10.2.

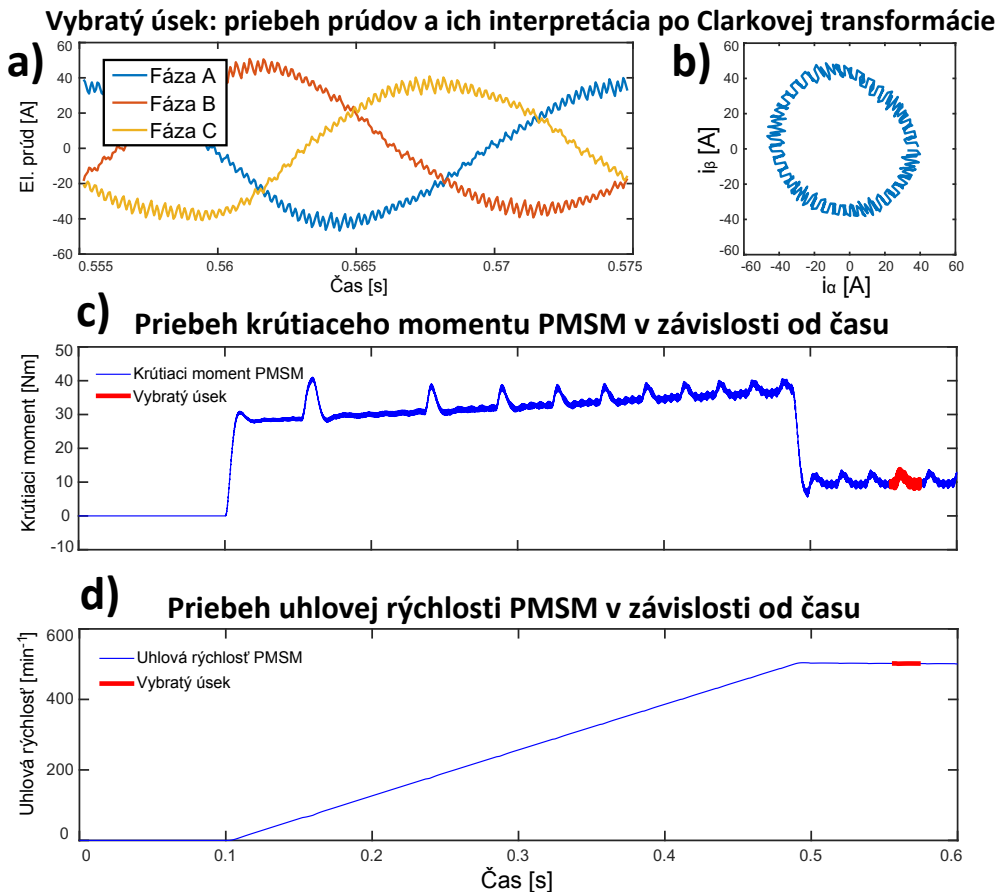
Naimplementovanie metódy do modelu je jednoduché – stačí si vytiahnuť trojfázový napájací prúd motora z bloku vektorového riadenia a na ne aplikovať Clarkovej transformáciu. Výstupom sú zložky prúdov v nových α - β súradniciach, tie sú potom ukladané do súboru. Vyhodnocovacia metóda je použitá za predpokladu konštantnej záťaže na výstupnom hriadeľi a pri opakujúcej sa činnosti mechatronického systému. Diagnostika bude prebiehať až v oblasti po dosiahnutí požadovaných otáčok.

3.4 Vyhodnocovacia metrika

Na kvantitatívne vyhodnotenie mechatronického systému je vhodné si presne zadefinovať ukazatele (indikátory) stavu. Zvolená vyhodnocovacia metrika bude zahŕňať vypočítaný polomer ideálnej Lissajousevej krivky, namerané polomerové maximá, ďalej aproximáciu Lissajousevej krivky z nameraných dát, jej orientáciu, natočenie, excentricitu a nakoniec vypočítané kvadratické kritérium.

3.5 Algoritmus prediktívnej diagnostiky

V predošlej kapitole bola predstavená vyhodnocovacia metrika, podľa ktorej sa bude vyhodnocovať stav systému. Teraz je nutné naprogramovať algoritmus na získanie kľúčových dát. Po naimplementovaní metódy sledujúcej Parkov vektor sú namerané dáta spracované naprogramovaným algoritmom v prostredí MATLAB, ktorý predstavuje jadro prediktívnej diagnostiky. Predpokladá sa, že motor bude v nepretržitom chode a jeho stav sa bude posudzovať z dlhodobého hľadiska. To znamená, že k vyhodnoteniu postačí algoritmus, ktorý dávkovo (off-line) spracuje namerané dáta. Konštantná záťaž navyše zaručí periodicitu chovania nameraných prúdov – prediktívna diagnostika v porovnaní s inými metódami bude pracovať so zlomkom dát. Snímané sú práve tie veličiny, ktoré je možné aj v praxi merať: trojfázové prúdy, moment a otáčky PMSM. Veličiny sú vzorkované s periódou vzorkovania bloku vektorového riadenia, t. j. $50\text{ }\mu\text{s}$. Grafický výstup algoritmu možno vidieť na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Naprogramovaný algoritmus: V a) je priebeh trojfázového prúdu vybraného úseku, v b) je jeho interpretácia po Clarkovej transformácii. Užívateľ si vyberá skúmaný úsek, ktorý ho zaujíma. To je znázornené v c) a v d), kde je zobrazený priebeh krútiaceho momentu, resp. uhlovej rýchlosti PMSM v závislosti od času.

Hlavná myšlienka algoritmu je založená na oddelení jednotlivých Lissajousových kriviek prúdu. Užívateľ si potom vyberá obrazec, ktorý je z jeho pohľadu zaujímavý. Jedinou limitujúcou podmienkou je výber oblastí až po dosiahnutí požadovaných otáčok PMSM. Tento proces je možné vidieť na Obr. 3.1c a Obr. 3.1d, kde je červenou farbou zvolený konkrétny sektor v čase simulácie 0,555-0,575 s. Vyznačenému úseku odpovedá trojfázový prúdový priebeh (Obr. 3.1a). Jeho interpretácia po použití Clarkovej transformácie je znázornená na Obr. 3.1b.

Tu sa naskytá otázka vyhodnotenia Lissajousových útvarov pri pôsobení poruchy. Diagnostika bude vychádzať z predpokladu bezporuchového stavu (dokonalý kruh so súradnicami v počiatku). Riešenie je aproximované modelom s jediným parametrom, a to polomerom kruhu, ku ktorému sa pripočítava aditívna chyba s rozptylom. V tomto prípade ako najlepší odhad jediného parametra posluží aritmetický priemer všetkých nameraných vzoriek jednej otáčky. Pre lepšiu názornosť sledovania zmeny parametra je naprogramovaná aj jeho rekurzívna varianta podľa (3.1):

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{1}{k} [y(k) - \hat{\theta}(k-1)] \quad (3.1)$$

kde $\hat{\theta}$ je odhad parametra v aktuálnom k -tom kroku, $\hat{\theta}(k-1)$ je jeho odhad v predošlom k -tom kroku a $y(k)$ je nameraný údaj v aktuálnom k -tom kroku. Iteratívnym cyklom sa k predošlému odhadu parametra pričíta váhový rozdiel aktuálnej nameranej hodnoty a jeho predošlého odhadu. Tým sa polomer kružnice postupne každou iteráciou spresňuje. Posledná iterácia predstavuje ideálnu Lissajousovu krivku, čiže bezporuchový stav, a je označená R_{av} ako priemerný polomer kružnice.

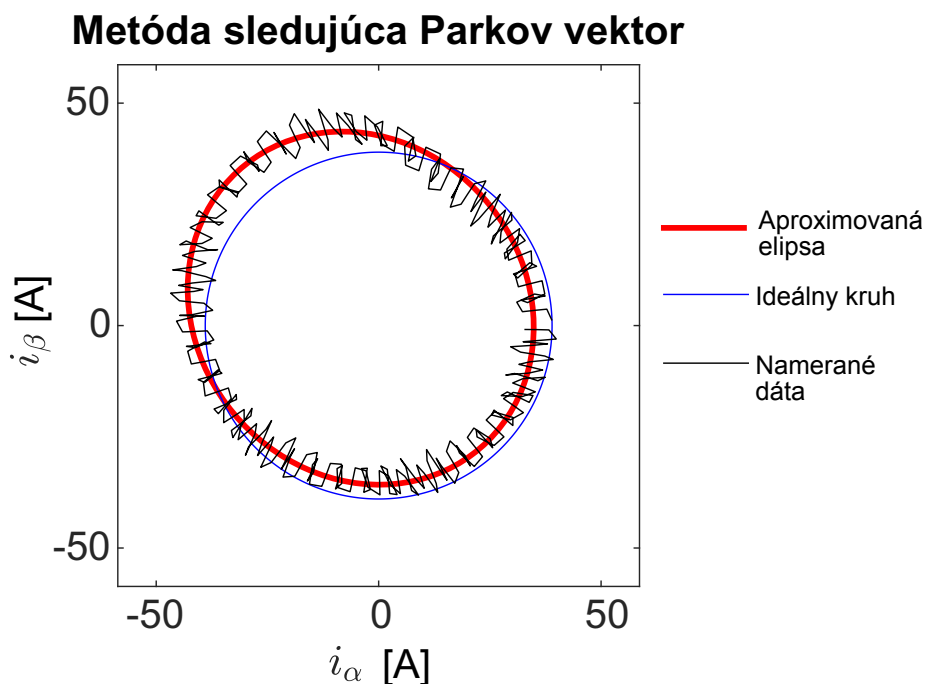
Kedže sa pri pôsobení poruchy predpokladá deformácia kruhových útvarov, k algoritmu je pridaný program z [27], ktorý vracia súbor geometrických parametrov s najvhodnejším popisom elipsy z danej množiny nameraných bodov. Naprogramovaný algoritmus vychádza z metódy najmenších štvorcov, pri ktorej sú neznáme parametre koeficienty rovnice vyjadrujúce popis kuželosečky – elipsy. Podrobnejší popis využitých matematických operácií a dopracovanie sa k finálnemu výsledku je v [27]. Z Obr.3.1b je zjavné, že Lissajousova krivka z nameraných dát nie je hladká a jej aproximácia použitým algoritmom bude výhodná pre tento návrh.

Na kvantitatívne posúdenie výsledkov posluží vhodne zvolené integrálne kritérium kvality. Konkrétne bola vybratá diskrétna varianta kvadratického kritéria v tvare (3.2), ktoré zaručí nezápornosť odchýliek. Toto kritérium pozostáva z rozdielu nameraných dát v kroku k a vypočítaného ideálneho polomeru s následným umocnením výpočtu. Je zjavné, toto kritérium dáva oveľa väčšiu váhu väčším odchýlkam než odchýlkam blížiacim sa k nule. Pre rôzny počet odmeraných vzoriek pri meraniach je kritérium normalizované. Toto kritérium dáva najlepšiu kvantita-

tívnu predstavu o vážnosti poruchy.

$$J = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y(k) - R_{av})^2 \quad (3.2)$$

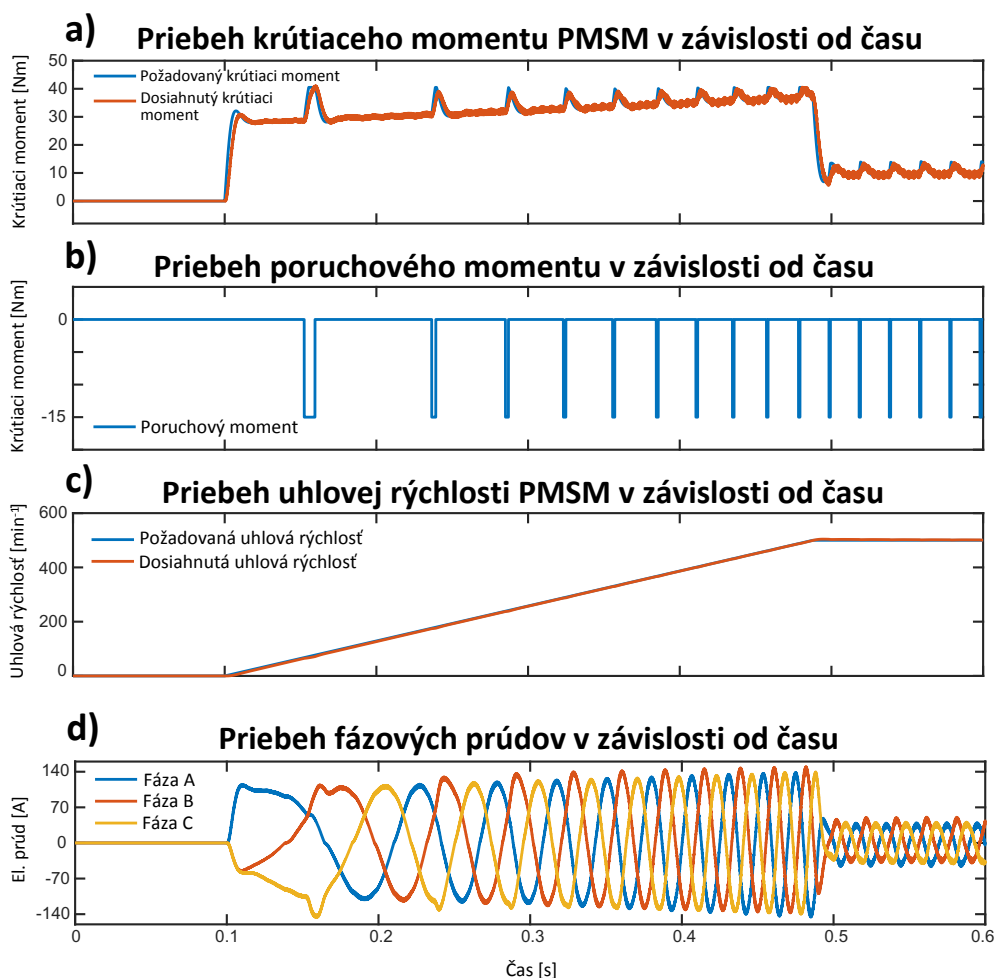
Po predstavení navrhnutých postupov je výsledok prediktívnej diagnostiky zobrazený na Obr.3.2. Výstupom sú tri priebehy: namerané dáta, ich aproximácia kruhovým útvarom a vypočítaný ideálny polomer krivky.



Obr. 3.2: Naprogramovaný výstup algoritmu

3.6 Simulácie drhnutia

Navrhnutý algoritmus je otestovaný na modeli (doplnenom o model poruchy a s namodelovanými snímačmi) z kapitoly 3.2. Podstata simulácie, priebehy veličín a grafické výstupy vychádzajú z nastavenia popísaného v kapitole 2.6. Zakomponovaný drhnutí momentový efekt bol zvolený v rozmedzí 0 Nm až 15 Nm. Porucha pôsobí po celý čas na rovnaké miesto, ktorým je pozícia rotora na intervale $\langle 1 \text{ rad}; 1,2 \text{ rad} \rangle$. Každou ďalšou simuláciou sa moment menil o veľkosť 0,1 Nm. To by predstavovalo postupné zhoršovanie poruchy. Príkladom simulácie pri pôsobení poruchy drhnutia s veľkosťou 15 Nm môže byť Obr. 3.3.

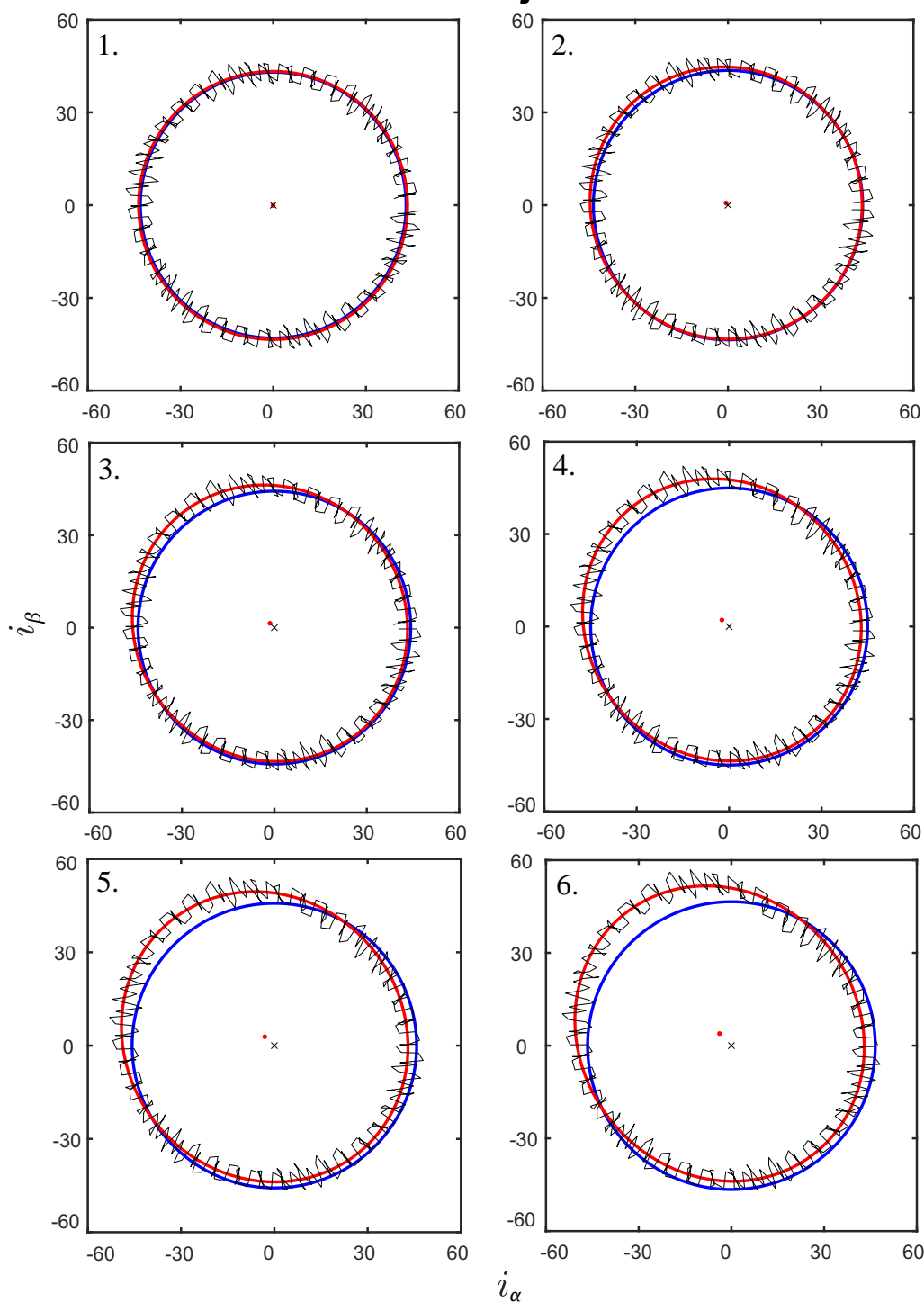


Obr. 3.3: Výsledky simulácie PMSM s efektom drhnutia, ktorý bol nastavený na 15 Nm. Nastavené parametre simulácie sú totožné s Obr. 2.9. V a) je vidieť priebeh požadovaného a skutočného točivého momentu PMSM, v b) je vykreslený priebeh poruchového momentu, v c) je zobrazený priebeh požadovaných a dosiahnutých otáčok PMSM a v d) priebeh trojfázových napájacích prúdov.

Po skončení každej simulácie sú sledované veličiny zaznamenané do samostatných súborov. Návrh myšlienky reťazca diagnostiky sa snaží priblížiť skutočný priebeh: Postupné zhoršovanie poruchy, užívateľom meraný stav motora a následnú diagnostiku. Výsledky prediktívnej diagnostiky zo simulácií sú zobrazené na Obr. 3.4.

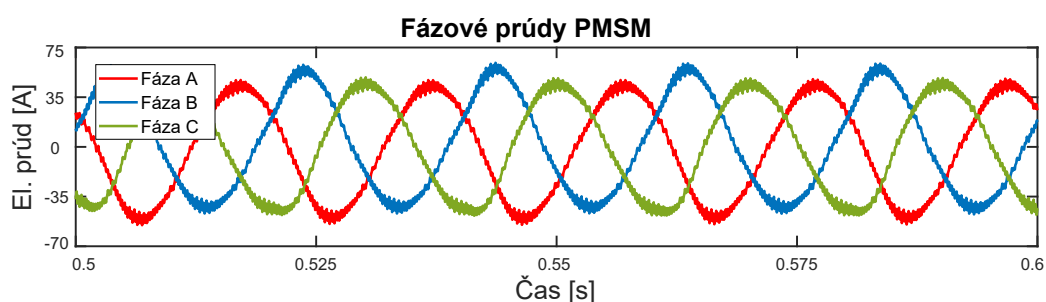
Pre nedostatok priestoru a prehľadnosť je zobrazený len zlomok nameraných dát. Zobrazené krivky sa líšia v pôsobení poruchového momentu, ktorý sa zhoršuje o 20 % každou ďalšou simuláciou. Prvá simulácia reprezentuje bezporuchový stav, na nej je možné vidieť, že aproximovaná Lissajousova krivka (červená krivka) z nameraných dát (čierna krivka) je ideálny kruh so stredom v počiatku, čo sa aj zhoduje s odhadom ideálnej kružnice (modrá krivka).

MCSA: Metóda sledujúca Parkov vektor



Obr. 3.4: Výsledky diagnostiky pomocou naprogramovaného algoritmu – metódy založenej na sledovaní Parkoveho vektora. Veľkosť efektu drhnutia bol zvolený v rozmedzí 0 Nm až 15 Nm. Každou ďalšou simuláciou bola jeho veľkosť zväčšená o 20 %. Modrá krivka reprezentuje ideálnu Lissajousovu krivku podľa vypočítaného ideálneho polomeru, červená krivka predstavuje elipsou aproximovanú Lissajousovu krivku z nameraných dát predstavených čiernou krivkou. Červený bod reprezentuje stred elipsy posunutý od počiatku súradnicového systému.

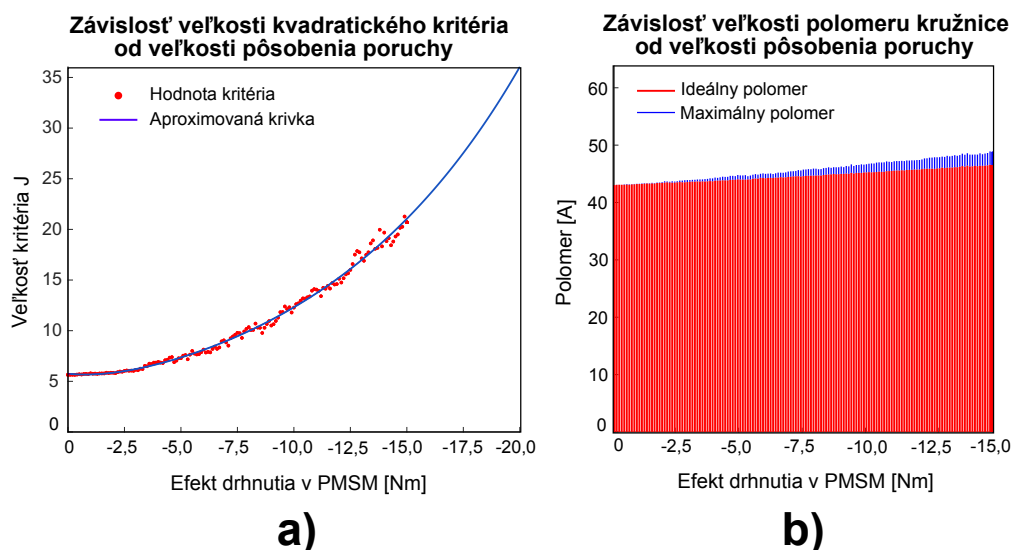
Výsledok je očakávaný podľa teoretického predpokladu. Pri pôsobení poruchy je na prvý pohľad jednoznačne preukázateľná deformácia Lissajousových kriviek na elipsovité útvary a odklon ich stredového bodu od počiatočných súradníc. Je zjavné, že zvyšujúca sa vážnosť poruchy zväčšuje deformáciu kruhového útvaru, pomyselný stredový bod elipsy sa vzdaluje a zväčšuje sa jej excentricita. Vo vzoroch sa uhol natočenia elipsy pri zvyšovaní poruchy nemení (elipsy sú natočené približne o 40° proti smeru hodinových ručičiek od zvislej osi). Deformácia vykazuje prítomnú prúdovú nerovnováhu v statore. Priebehy napájacích prúdov sú znázornené na Obr. 3.5.



Obr. 3.5: Detail simulácie nameraného trojfázového prúdu po dosiahnutí požadovaných otáčok a pri pôsobení brzdného momentu 15 Nm v čase $\langle 0,5\text{ s}; 0,6\text{ s} \rangle$

Na Obr. 3.6b je zasa možné vidieť, že polomer odhadnutých ideálnych Lissajousových útvarov sa so zvyšujúcou závažnosťou poruchy lineárne zväčšuje. To indikuje, že porucha zvyšuje dopyt po napájacom prúde. Napájacie prúdy sa zväčšili za pôsobenia maximálnej simulovanej poruchy približne o 2 A. Porucha v podobe drhnutia ovplyvňuje momentovú veličinu. Pri každom drhnutí sa motor snaží vyrovnať nerovnováhu generovaním zvýšeného momentu, čo sa prejaví na zvýšenom napájacom prúde. Ďalej na Obr. 3.6b sú znázornené aj maximálne hodnoty z jednotlivých nameraných súborov. Zvyšujúca sa porucha spôsobuje zväčšujúce sa odchýlky od vzoru ideálneho odhadu – vznikajú krátkodobé prúdové zaťaženia.

Závislosť normalizovaného kvadratického kritéria podľa (3.2) od veľkosti poruchy je znázornená na Obr. 3.6a. Ďalej je táto závislosť aproximovaná pomocou toolboxu s exponenciálnym modelom (červená krivka), ktorý je definovaný štyrmi parametrami. Z kritéria je možné jednoznačne vyčítať priebeh vážnosti poruchy a jej budúci trend. Na priebehu je možné vidieť, že porucha v počiatočnom štádiu sa na prúdoch takmer neprejavuje. Približne až od pôsobenia 30 percentnej poruchy aproximovaná krivka naberá na strmosti a jej veľkosť sa exponenciálne zväčšuje. Pri pôsobení poruchy 15 Nm je veľkosť kritéria skoro päťnásobne väčšia v porovnaní s bezporuchovým motorom. Extrapoláciou je možné predikovať trend krivky do budúcnosti (Obr. 3.6a).



Obr. 3.6: Priebehy ďalších identifikátorov stavu motora. V a) je zobrazená závislosť normalizovaného kvadratického kritéria od veľkosti poruchy. Ďalej je vyobrazená aproximovaná exponenciála tejto závislosti. V b) sú zobrazené veľkosti vypočítaných odhadov ideálneho priemeru Lissajousových kriviek a maximálne hodnoty v nameraných dátach v závislosti od veľkosti poruchy.

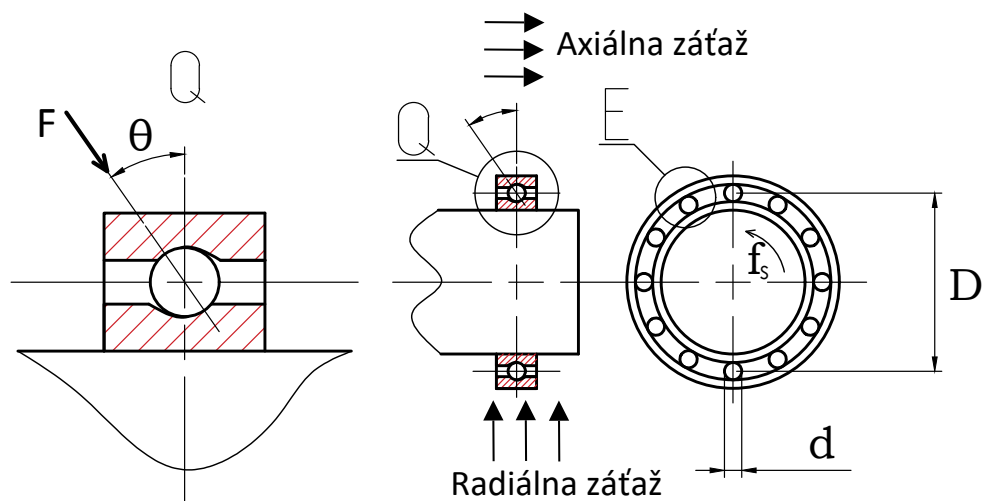
Tieto výsledky je možné interpretovať len po dosiahnutí požadovaných otáčok motora a zadaných obmedzujúcich podmienok z kapitol 2.5 a 3.3. Inak navrhnutá prediktívna diagnostika môže byť neefektívna. Dôvod je vysvetlený nasledovne: Keďže motor je na začiatku v kludovom stave, jeho rozbeh je charakterizovaný generovaním maximálneho možného momentu, ktorý je daný jeho fyzikálnou realizovateľnosťou a jeho parametrami. To znamená, že porucha v podobe brzdného momentu sa nemusí prejavíť na zvýšenom generovanom momente. Okrem toho výsledky prúdov môžu byť ovplyvnené dynamikou prúdových regulačných obvodov.

Po vykonaných simuláciách možno vyvodit záver, že postupne zväčšujúca sa veľkosť poruchy má za následok zmenu prúdovej rovnováhy v napájacom prúde, čo sa prejaví na prúdoch statora. Za použitia metódy sledujúcej Parkov vektor sa na modelovanú poruchu konkrétne prejavila na postupných deformáciách vzorov v jednom smere podľa jej vážnosti. Identifikáciu navrhnutéj poruchy metódou MCSA je preto možné považovať za úspešnú. Ďalej naprogramované nástroje na kvantitatívne vyhodnotenie poruchy, napr. kvadratické kritérium, môže pomôcť pri vyhodnotení stavu motora. Užívateľ vo výrobe sleduje vývoj poruchy a jej budúci trend. Otázkou už len zostáva stanoviť povolené medzné hodnoty a hranice. Po ich prekročení bude možné prehlásiť, že motor je poruchový a je potrebná jeho výmena alebo oprava.

4 Diagnostika ložísk

Ložiská prenášajú pohyb a zachytávajú sily v radiálnom a axiálnom smere (Obr. 4.1). Ďalej sa snažia minimalizovať trenie medzi pohyblivými a pevnými časťami mechanizmu. V predošlej kapitole bolo naznačené, že najmä ložiská sú najcitlivejšie na nežiadúce efekty drhnutia. Podľa Obr. 1.6, ložiskové problémy predstavujú vyše polovicu celkových zlyhaní hnacích mechanizmov, a preto sa nasledujúci výskum bude venovať práve tejto problematike.

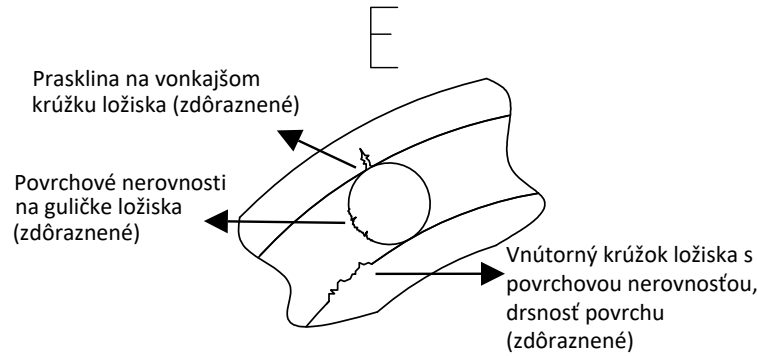
Ložiská možno rozdeliť podľa viacerých kritérií. V súvislosti s výskumom v tejto práci stojí za zmienku rozdelenie ložísk podľa konštrukcie. Rozlišujeme valivé a klzné ložiská. Klzné ložiská pozostávajú z puzdra a hriadeľa, ktorý ním prechádza. Medzi plochami je iba tenká vrstva mazadla. Valivé ložiská obsahujú pohybujúce sa telieska rôznych tvarov (guličkové, súdkové, kuželíkové, valčekové, ihlové atď.). Typické valivé guličkové ložisko je znázornené na Obr. 4.1. Valivými rotačnými prvkami (napr. guľkami), ktoré sa nachádzajú medzi vonkajším a vnútorným krúžkom ložiska, je znížené trenie medzi hriadeľom a strojným komponentom.



Obr. 4.1: Výkres guličkového ložiska pripojeného na hriadeľ: Pohľad nárysu a bokorysu s priblíženým detailom na rez bokorysom. Výkres je ďalej doplnený o charakteristické parametre ložiska.

Valivý pohyb je prirodzene náchylný na materiálové nerovnosti a nedokonalosti. Poruchy týkajúce sa valivých ložísk možno lokalizovať vo valivých elementoch vo vnútornom a vonkajšom krúžku. Defekty (znázornené na Obr. 4.2) vznikajú pri nedokonalom povrchu súčiastok, opotrebovaní materiálu a vznikajúcich prasklinách. Vysokofrekvenčné rezonancie nastávajú pri náraze valivého prvku s poruchovou oblasťou. Výsledkom sú pravidelné periodické impulzy vo vibračnom signále na určitých frekvenciách podľa postihnutej časti. Tieto charakteristické frekvencie

sa dajú určiť vzorcami, ktoré závisia od parametrov konkrétneho ložiska. Preto je nevyhnutná znalosť jeho konštrukčných parametrov. K identifikácii parametrov dopomáha fakt, že ložiská sa vyrábajú v normalizovaných veľkostiach. Ich veľkosť je preto možné určiť zo strojníckych tabuliek. [15]



Obr. 4.2: Detail priblíženej oblasti z Obr. 4.1: Nedokonalosti jednotlivých prvkov, ktoré vedú k poruchám ložiska. Konkrétne je zobrazená povrchová nedokonalosť valivej guľičky a defekty na povrchoch vnútorného a vonkajšieho krúžku.

Jednotlivé frekvencie impulzov vzhľadom na ich miesto pôsobenia sa určujú podľa rovníc (4.1)-(4.4) [28]. Fundamentálna kľetková frekvencia (*Cage Frequency*) sa počíta podľa:

$$f_c = \frac{1}{2}f_s \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (4.1)$$

Frekvencia defektu valivej guľičky (*Ball Defect Frequency*) je dvojnásobok jej frekvencie otáčania a určuje sa vzťahom:

$$f_{bd} = \frac{D}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \theta \right) \quad (4.2)$$

Frekvencie defektu vnútorného krúžku (*Inner Race Defect Frequency*) a vonkajšieho krúžku (*Outer Race Defect Frequency*) sú určené vzťahmi:

$$f_{ird} = n(f_s - f_c) = \frac{n}{2}f_s \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (4.3)$$

$$f_{ord} = nf_c = \frac{n}{2}f_s \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (4.4)$$

Ako už bolo povedané, použité vzťahy závisia len od konštrukčných parametrov ložiska, kde f_s je frekvencia otáčania hriadeľa (čiže otáčky rotora), d je priemer guľičky, n je počet guľičiek v ložisku, D je priemer kružnice, po ktorej sa valia guľičky, a θ je uhol kontaktu. Tieto vzťahy je možné jednoducho vypočítať, najst v prúdovom spektre modulované frekvenčné zložky a identifikovať poruchovú časť.

4.1 Model ložiska a model poruchy

Po predstavení základnej konštrukcie valivého ložiska a možných pôsobiacich porúch je jeho model nainplementovaný do predpripraveného modelu riadenia PMSM. Keďže Simulink a rozšírenie Simscape neobsahujú v knižnici blok modelu ložiska, je nutné zvoliť inú stratégiu.

Prvotný návrh riešenia bol založený na využití rozšírenia Simscape Multibody™ a nainštalovaní doplnkovej knižnice *Contact Forces Library* z [29]. Rozšírenie by poskytovalo prostredie na modelovanie a simuláciu 3D systémov. Stiahnutá knižnica by zase poskytovala 2D a 3D komplexne namodelované pohyby mechanických prvkov (medzi nimi aj napr. model jednoduchého ložiska). Model ložiska by bol úspešne prepojený s prostredím modelu PMSM. Problém však nastal pri návrhu poruchy ložiska. Simscape Multibody™ nepodporuje komplexné modelovanie prvkov. Príkladom môže byť napr. valivá guľička reprezentovaná prvkom ideálna guľa a bez možností dodatočných geometrických úprav (napr. zakomponovania poruchy povrchovej nerovnosti, praskliny atď.). Navyše prepojený model ložiska výrazne spomaľoval simulácie. Z týchto dôvodov bolo od pôvodného plánu využitia modelu ložiska upustené (aj keď bol graficky názorný).

Doterajší postup len potvrdil, že matematický model takého komplexného prvku, akým je ložisko, je obtiažne namodelovať v prostredí Simulinku. Preto je pozornosť sústredená na samotný koncept ložiska, ktorým je valivý pohyb guľičiek. Pre testovacie účely je z katalógového listu vybraný konkrétny model ložiska, ktorý by pasoval k pohonu PMSM. Ide o ložisko s číslom 6004. Konštrukčné parametre popisujúce ložisko nie sú z hľadiska diagnostiky zaujímavé, je však potrebné z nich určiť hľadané parametre z rovníc (4.1)-(4.4). Model ložiska bol vyexportovaný do výkresového softvéru AutoCAD, kde boli identifikované neznáme parametre. Parametre ložiska sú uvedené v Tab. 4.1.

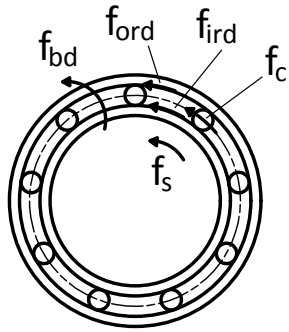
Tab. 4.1: Konštrukčné parametre ložiska triedy 6004

PARAMETER	HODNOTA
Hmotnosť (kg)	0,067
Vnútorň priemer (mm)	20
Vonkajší priemer (mm)	42
Šírka (mm)	12
Počet guľičiek	9
Priemer guľičky (mm)	6,35
Stredný priemer ložiska (mm)	31
Kontaktný uhol (°)	10-25

Problémom ešte zostáva parameter kontaktného uhla, ktorý sa dynamicky mení podľa spôsobu a typu zaťaženia v chode motora. Parameter kontaktného uhla sa typicky pohybuje v rozsahu od $10 - 25^\circ$. Príliš veľká hodnota uhla zvyšuje riziko vypadnutia guľičky z kletky (s valivými telesami). Naproti tomu nízka hodnota zase môže spôsobiť úplné zaseknutie pohyblivých častí. Predpokladáme, že záťaž sa dynamicky nemení. Kontaktný uhol bol pevne zvolený na hodnotu 15° . Kritické frekvencie závisia na frekvencii otáčania hriadeľa. Diagnostika bude prebiehať až po dosiahnutí požadovaných otáčok, ktoré boli zvolené na hodnotu 900 min^{-1} . Frekvencia otáčania hriadeľa je preto zvolená na hodnotu 15 Hz . Po určení neznámych parametrov sú vypočítané kritické frekvencie v závislosti od miesta pôsobenia. Ich konkrétne pôsobenie na ložisku a ich veľkosti sú zobrazené v Tab. 4.2.

Znalosť veľkosti kritickej frekvencie je využitá v súvislosti s modelom poruchy. Model ložiska je nepriamo vyjadrený cez pomer rýchlosti otáčania hriadeľa a vybranej kritickej frekvencie, ktorej aktuálna veľkosť závisí práve od rýchlosti otáčania hriadeľa. Rýchlosť otáčania je vo vzťahu vykrátená, takže pomerové číslo je konštanta závislá od pevných parametrov ložiska. Ďalej je do modelu pripojená zotrvačnosť, ktorá reprezentuje namodelované ložisko. Jej veľkosť bola určená softvérom Autodesk Inventor, ktorý ju automaticky vypočítal z vyexportovaného modelu ložiska ($18,882 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$). Pôsobenie poruchy je založené na podobnom princípe, akým bolo namodelované drhnutie z predchádzajúceho výskumu. Jediný rozdiel spočíva v kratšej dobe pôsobenia a frekvencií opakovania javu – porucha sa bude násobne opakovať podľa aktuálneho pomerového čísla. Týmto spôsobom je možné naimplementovať model ložiska a zároveň simulovať namodelovanú poruchu podľa nášho výberu. Porucha bude reprezentovať napr. cyklické zaťaženie, postupné šírenie prasklín materiálom, únavu materiálu, postupnú degradáciu materiálu atď.

Tab. 4.2: Kritické frekvencie ložiska triedy 6004 pri rýchlosti otáčania 900 min^{-1}

FREKVENCIA	HODNOTA	
Defekt valivej guľičky (Hz)	4,76	
Defekt vnútorného krúžku (Hz)	56,99	
Defekt vonkajšieho krúžku (Hz)	78,01	
Klietka (Hz)	8,67	

4.2 Implementácia prediktívnej diagnostiky do modelu s poruchou na ložisku

Kapitoly 1.8 (Vibrodiagnostika) a 1.10 (MCSA) sa venovali faktu, že charakteristické vibrácie spôsobujú anomálie na hustote toku vzduchovej medzery, čo má za následok moduláciu statorového prúdu podľa vzťahu: [15]

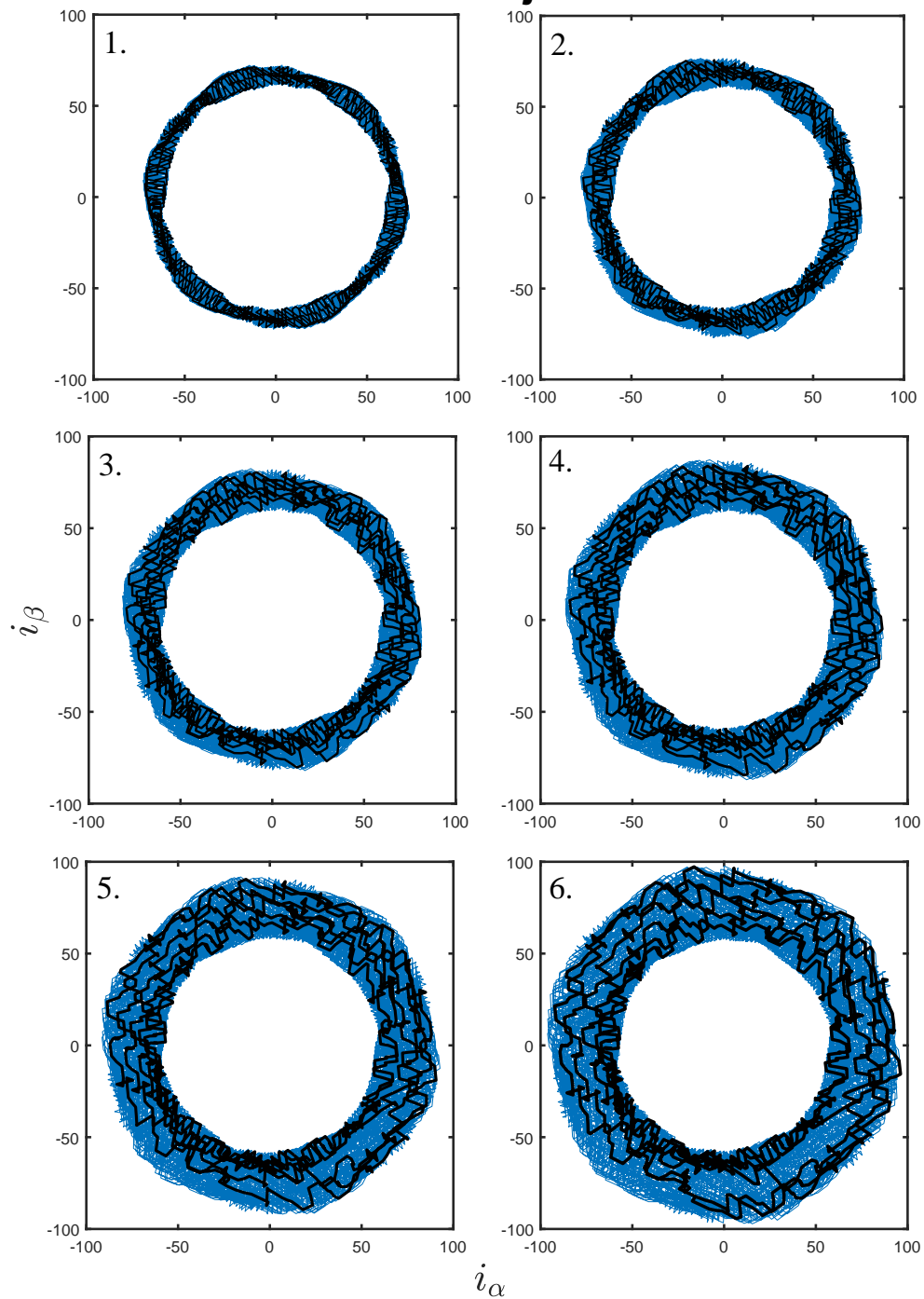
$$f_m = f_e \pm m \times f_v \quad (4.5)$$

kde f_e je napájacia frekvencia, m je 1,2,3,... a f_v je charakteristická frekvencia poruchy. V našom prípade je charakteristická frekvencia reprezentovaná kritickými frekvenciami z Tab. 4.2. Postranné frekvenčné pásma postupne slabnú s narastajúcim číslom. Nosná napájacia frekvencia býva často jedinou dominantnou špičkou spektra. Minoritné pôsobenie poruchy je práve preto pohltené touto zložkou. Ďalšou nepríjemnosťou je nutnosť sledovania všetkých troch fáz. Implementovaním metódy sledujúcej Parkov vektor z kapitoly 3.3 sa tieto komplikácie podarilo vyriešiť. Trojfázové prúdy boli graficky vyjadrené kruhovitými vzormi. Grafické vyhodnotenie vzorov naprogramovanými nástrojmi je pre svoju jednoduchosť a názornosť vhodné do bežnej rýchlej diagnostiky. Aj keď Lissajousova krivka obsahuje úplnú informáciu o stave motora, grafická analýza ložiskových porúch v počiatočnom štádiu je neúčinná – je obtiažne kvantitatívne rozlíšiť vzory od poruchových. Z týchto dôvodov je do modelu implementovaná jej roširená varianta – EPVA. Jej teoretický princíp, podstata a výhody oproti klasickej metóde sú popísané v kapitole 1.10.3. Spektrum modulu Parkovho vektora dokáže teoreticky definovať kritické frekvencie už na začiatku pôsobenia poruchy. Nárast magnitúdy na kritickej frekvencii je lineárne závislá od vážnosti poruchy. Pre lokálne defekty (Obr. 4.2) sú modulované násobky kritických frekvencií. Implementácia EPVA vo vývojovom prostredí MATLAB je pomerne jednoduchá a výsledky spektra budú pridané k sade naprogramovaných nástrojov pre prediktívnu diagnostiku.

4.3 Simulácia systému s poruchou na ložisku

Po predstavení modelu ložiska je systém otestovaný simuláciou. Porucha bola zvolená na vonkajšom krúžku ložiska (viď. Obr. 4.2). Predstavuje akúsi malú prasklinu, ktorej vážnosť sa postupom času zhoršuje. Pri skúmaní drhnutia z predchádzajúceho výskumu sa na diagnostiku využíval len jeden vzor. Teraz sú vzory na seba preložené a namerané dáta sú zobrazované z časového intervalu, v ktorom je už motor na požadovaných otáčkach (900 min^{-1}). Ďalej je na výstupe namodelovaná jednoduchá záťaž, ktorá má veľkosť 18 Nm. Doba simulácie je nastavená na 2 s.

MCSA: Metóda sledujúca Parkov vektor



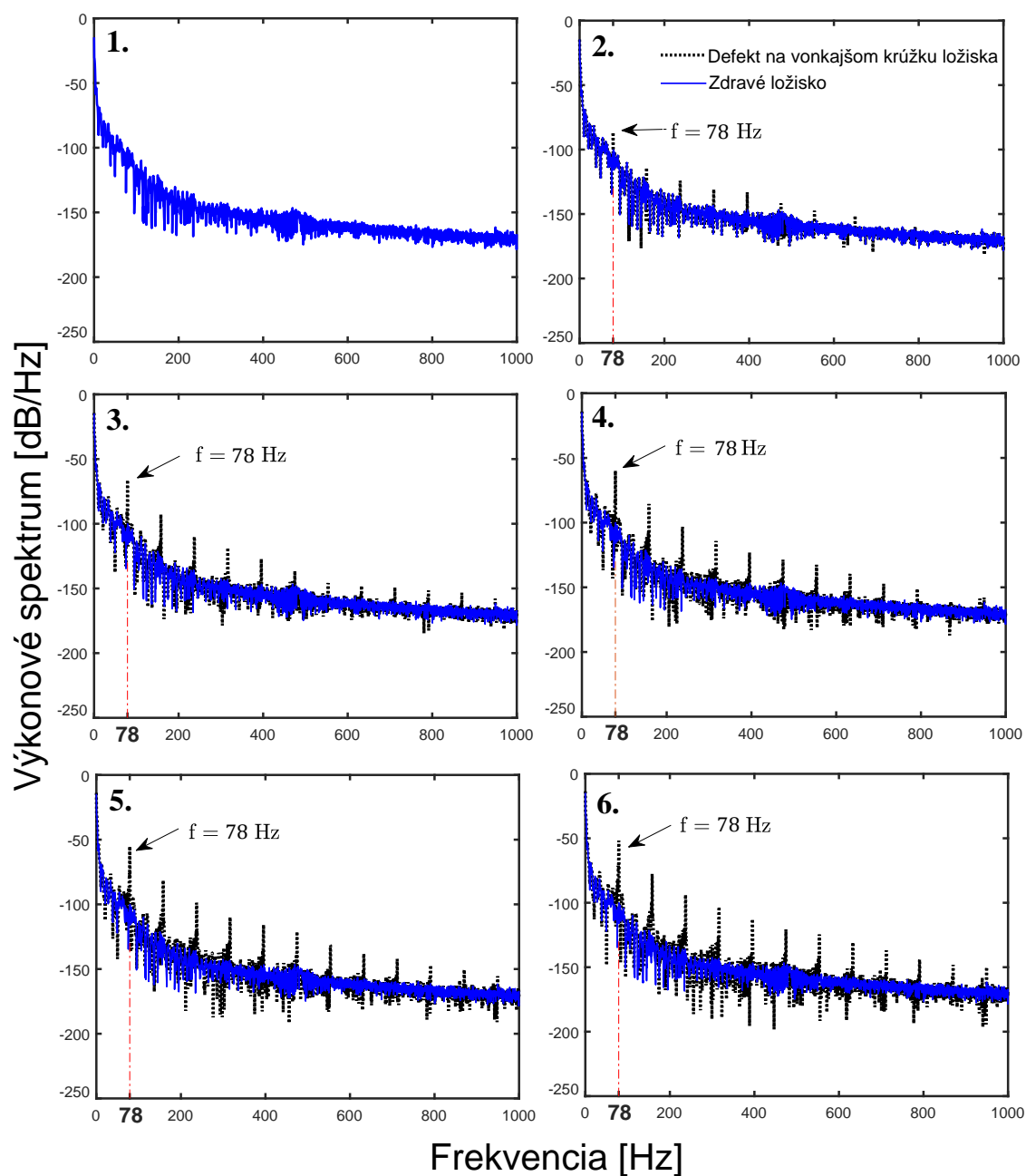
Obr. 4.3: Výsledky diagnostiky za použitia metódy založenej na sledovaní Parkovho vektora na mechatronický systém s poruchovým ložiskom. Prvá simulácia predstavuje bezporuchový systém. Veľkosť poruchy na vonkajšom krúžku sa zhoršoval každou ďalšou simuláciou o 20 %. Modré vzory reprezentujú preložené Lissajousove krivky v ustálenom stave po dosiahnutí požadovaných otáčok 900 min^{-1} v čase simulácie 0,5-2,0 s a pri pôsobení momentovej záťaže 18 Nm. Čierna krivka predstavuje jednu otáčku valivého elementu v ložisku v čase simulácie 0,989-1,056 s.

Celkové namerané výsledky sú znázornené na Obr. 3.4. Pozornosť je najprv upriamená na bezporuchový stav. Na prvý pohľad je zaujímavé, že aj vzor bezporuchového stavu má taktiež určitú hrúbku, dokonca zdravé a počiatočné poruchové stavy sú veľmi podobné. Blok vektorového riadenia a prepínacia frekvencia IGBT pracujú s inou vzorkovaciou frekvenciou, čo spôsobuje mierne zmeny trajektórie Parkovho vektora, a preto vektorový vzor získa svoju charakteristickú hrúbku. To by vysvetľovalo aj jednu nevyhladenú otáčku Parkovho vektora v bezporuchovom stave z predošlej kapitoly na Obr. 3.4. V reálnom chode motora sú to práve výkyvy napájacej frekvencie, ktoré spôsobujú zmeny trajektórie Parkovho vektora. V prípade, že by bol PMSM napájaný priamo z elektrickej siete, potom by sa docielilo zmenšenie hrúbky vzoru a jeho vyhladenie [30]. Ďalej je si možné všimnúť, že vzory bezporuchového stavu sú rovnomerne deformované v určitých úsekoch. Tieto deformácie sú spôsobené asymetriami napäťových zdrojov (nerovnomerným rozložením záťaže na fázu) a vlastnými asymetriami motora či už elektrického pôvodu (iná impedancia vo vinutiach), alebo mechanického pôvodu (výrobné nedokonalosti – vzduchová medzera nie je nikdy symetrická).

Po analýze bezporuchového stavu sú teraz vyhodnotené poruchové vzory. Krivky sú preložené na seba z dôvodu použitia celého intervalu nameraných dát s cieľom zachytenia zmien stavov na ložisku. Jeden vzor (čierna krivka na Obr. 4.3), ktorý reprezentuje len jednu celú otáčku valivého elementu celým ložiskom, sa skladá z niekoľkých kriviek. To znamená, že naprogramované algoritmy z predošlej kapitoly sú z hľadiska monitorovania poruchy na vonkajšom krúžku ložiska nevhodné, a preto nemôžu byť efektívne použité.

Je však zjavné, že zvyšujúci vplyv poruchy má za následok zväčšujúcu sa hrúbku vzoru. Hrúbka vzoru pri pôsobení poruchy v poslednej simulácii, kde jej pôsobenie sa blíži k hraničným stavom bezpečnosti, je v porovnaní s bezporuchovým stavom skoro štvornásobne väčšia. S rastúcou vážnosťou poruchy sú zmeny viditeľné a teoreticky sa dajú použiť na vyhodnotenie poruchy. Vzory jednoznačne poukazujú na abnormálny stav systému a prúdovú nerovnováhu v statore – dodaný zvýšený výkon sa odzrkadlí na zvýšenom napájanom prúde. Je však potrebné si však uvedomiť, že cieľom diagnostiky je identifikácia špecifickej poruchy na vnútornom krúžku ložiska. Pri súčasnom pôsobení ďalších porúch v reálnom chode je táto diagnostika vzorov z praktického pohľadu nevhodná. Teoreticky by bola metóda použiteľná za predpokladu širokej databázy vzorov a praktických ukážok. Z týchto dôvodov je implementovaná jej rozšírená varianta EPVA, ktorej myšlienka a princíp sú popísané v kapitole 4.2. Za predpokladu pôsobenia len tejto poruchy sa očakáva, že v spektre by mala byť indukovaná práve táto harmonická zložka. Pri aktuálne nastavených parametroch motora a známych geometrických rozmeroch ložiska sa táto harmonická zložka očakáva na frekvencii 78,01 Hz. Získané výsledky sú zobrazené na Obr. 4.4.

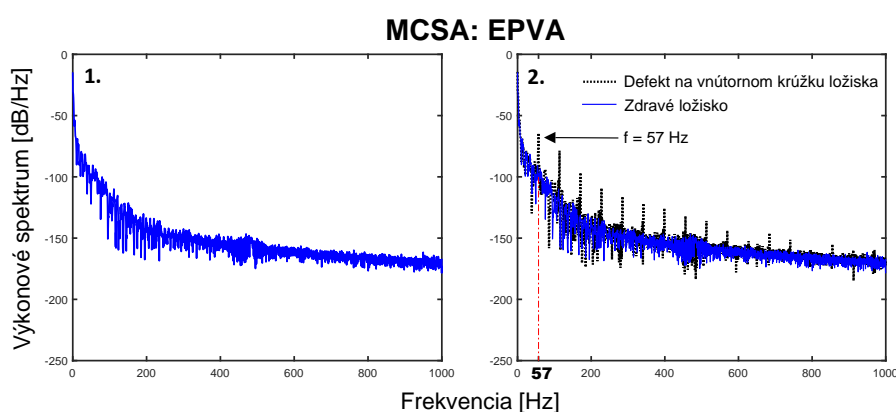
MCSA: EPVA



Obr. 4.4: Výsledky prediktívnej diagnostiky pri použití metódy EPVA (rozšírenej metódy sledujúcej Parkov vektor) na mechatronický systém s poruchou (prasklinou na vonkajšom krúžku ložiska). Prvý graf zobrazuje výkonové spektrum bezporuchového systému, kde zvislá os je v decibeloch. Ďalej sú na obrázkoch znázornené výkonové spektrá modulov Parkovho vektora bezporuchového stavu (modré spektrum) a poruchového stavu (čierne spektrum). Každou ďalšou simuláciou sa porucha zhoršovala o 20 %. Parametre simulácie sú totožné ako v Obr. 4.3.

Na týchto obrázkoch je možné vidieť vývoj výkonového spektra modulov Parkovho vektora v decibelovej mierke v závislosti od veľkosti. Pozícia výkonového spektra kopíruje pozíciu vzoru z Obr. 4.3. Ešte je potrebné dodať potrebné informácie k spektrálnej analýze: výkonové spektrum je tvorené zo signálu, ktorému bolo odstránené jedno postranné pásmo po aplikovaní FFT. Vzorkovacia frekvencia je nastavená na 20 000 Hz a s časom simulácie 2 s je k dispozícii presne 20 001 vzorkov. Toto nastavenie poskytuje dostatočné rozlíšenie približne 0,5 Hz. Interval sledovania spektra je obmedzený do 1000 Hz. Toto nastavenie je z dôvodu polohy kritických frekvencií, ktoré ležia v nízkofrekvenčnom pásme pri normálnych rýchlostiach. V praktických situáciách sa ale tieto frekvencie môžu mierne líšiť v dôsledku kĺzania valivých prvkov ložiska [28]. Preto existuje predpoklad ich posunutia na spektre.

Ako bolo teoreticky predpokladané, fundamentálna frekvencia PMSM je vo všetkých simuláciách metódou EPVA zo spektra vylúčená. Prvá simulácia predstavuje bezporuchový stav a poslúži na porovnanie s poruchovým systémom. To, čo nebolo možné zreteľne vidieť na grafických vzoroch na Obr. 4.3 (rastúci trend vážnosti poruchy konkrétne na vonkajšom krúžku ložiska), spektrálna analýza zobrazuje vernejšie (Obr. 4.4). Zatiaľ čo v bezporuchovom stave sú prítomné len DC komponenty modulu Parkovho vektora, v poruchových stavoch sú naindukované ďalšie harmonické zložky. Už v skorom počiatočnom štádiu poruchy sú prítomné harmonické zložky práve na kritickej frekvencii $f_{ord} = 78$ Hz a na jej násobkoch. Ich veľkosť je každým ďalším násobkom tlmená. Amplitúdy na týchto frekvenciách sa postupne lineárne zväčšujú v závislosti od vážnosti poruchy. Správnosť riešenia je otestovaná ďalšou simuláciou (Obr. 4.5).



Obr. 4.5: Výsledky prediktívnej diagnostiky pri použití metódy EPVA (rozšírenej metódy sledujúcej Parkov vektor) na mechatronický systém s poruchou (prasklinou na vnútornom krúžku ložiska). Prvý graf zobrazuje výkonové spektrum bezporuchového systému. Druhý obrázok zobrazuje výkonové spektrá modulu Parkovho vektora bezporuchového stavu (modré spektrum) a poruchového stavu (čierne spektrum).

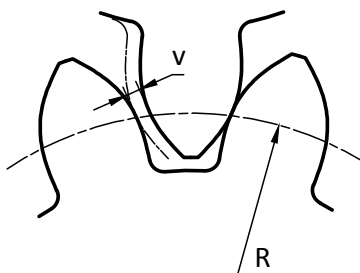
Parametre simulácie zostali nezmenené a porucha pôsobenia je nastavená na 40 %. Tentokrát však bude porucha pôsobiť na vnútornom krúžku ložiska. Podľa Tab. 4.2 sa očakáva, že kritická frekvencia poruchy vnútorného krúžka sa bude pohybovať v blízkosti hodnoty $f_{ird} = 57 \text{ Hz}$. Výsledky sú zobrazené na Obr. 4.5.

Simulácie inej poruchy potvrdili funkčnosť algoritmu, ktorý zase detekoval na-indukované harmonické zložky na násobkoch frekvencie $f_{ird} = 57 \text{ Hz}$, ktorá reprezentuje práve poruchu na vnútornom krúžku ložiska. Harmonické zložky sú identifikované už v skorom počiatočnom štádiu vývoja poruchy. Ich charakteristiky sú podobné z predchádzajúcich simulácií na Obr. 4.4. Týmito simuláciami je potvrdená úspešnosť metódy EPVA, ktorá je vhodná na identifikáciu ložiskových porúch.

5 Mechatronický systém s vôľou v prevode

5.1 Vôľa v prevodoch

V strojnom inžinierstve je vôľa definovaná ako voľný pohyb mechanizmu. Konkrétne ide o maximálnu možnú vzdialenosť, ktorou sa môže mechanizmus voľne pohybovať v oboch smeroch bez použitia znateľnej cudzej sily. V kontexte s prevodovými sústavami je vôľa interpretovaná ako veľkosť medzery po zábere zubov ozubených kolies (Obr. 5.1).

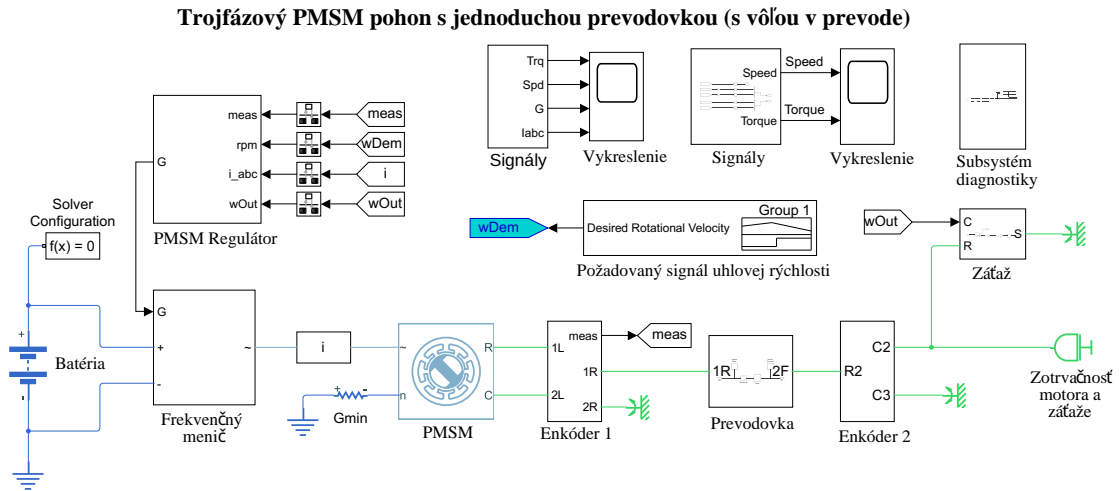


Obr. 5.1: Vôľa v prevode pri jednom zábere spárených zubov ozubených kolies. Obrázok prevzatý a upravený z [31].

V závislosti od veľkosti a aplikácie sa vôľa v prevodoch nemusí vždy javiť ako poruchový stav, ba v niektorých prípadoch je nevyhnutná. Príkladom môžu byť prevody s reverzibilným chodom, v ktorých vôľa zabraňuje zaseknutiu ozubených kolies. Zároveň necháva priestor na mazanie súčastok a na neželané deformácie spôsobené teplotnou rozťažnosťou materiálu alebo namáhaniaми rôzneho druhu. Na druhej strane však príliš veľká vôľa môže spôsobovať zvýšený hluk, prehriatie mechanizmu a momentové nárazy pri zábere. Tieto javy výrazne prispievajú k zvýšenej poruchovosti sústavy a častej výmene chybových súčastok. Vôľa sa prakticky môže do mechanizmu implementovať zmenšením hrúbky jednotlivých zubov kolesa.

Určenie vôle v jednoduchom prevode (Obr. 5.1) sa odvíja od diferencie hrúbky zubov na rozstupovej kružnici. Podstatne zložitejšie sa určuje vôľa v prevodových mechanizmoch, pozostávajúcich z troch a viac ozubených kolies. Celková vôľa sa rovná súčtu vôlí spárených kolies. K tomu je ešte potrebné vziať do úvahy prevodový pomer každého záberu vzťahného na vybraté ozubené koleso. Konkrétne výpočtové vzorce z hľadiska zadania práce nie sú zaujímavé, preto nie sú zahrnuté. Ich celkový prehľad je v [31]. Praktická časť tejto práce sa bude venovať výhradne jednoduchšej prevodovej sústave s dvomi ozubenými kolesami.

5.2 Model mechatronického systému s vôľou v prevode



Obr. 5.2: Schéma mechatronického systému s vôľou v prevode v Simscape

Navrhutý model mechatronického systému s vôľou v prevode vychádza z pôvodnej schémy (Obr. 2.2) PMSM pohonu, ktorý je popísaný v kapitole 2.3. K motoru je pripojený subsystém jednoduchej mechanickej sústavy. Jej základom je blok jednoduchej prevodovky (*Simple Gear*) s prevodovým pomerom 2. Zapojením prevodovky do modelu sa docieli dvakrát väčší vygenerovaný točivý moment pri dvakrát nižšej uhlovej rýchlosti na výstupnom hnanom hriadeľi v ustálenom stave. Jednoduchá prevodovka je ideálna, bez trecích strát a je reprezentovaná dvomi ozubenými kolesami. Každému kolesu je blokom *Inertia* nastavená charakteristická zotrvačnosť. K prevodovke je ďalej pridaná vôľa pri prevode, ktorá bude predstavovať poruchový stav. Vôľa pri prevode je namodelovaná ako obmedzenie rotačného pohybu fyzikálneho signálu pomocou bloku *Rotational Motion Hardstop*. Parameter vôle je nastavený za predpokladu, že hnané koleso má v počiatočnej polohe rovnomerne rozloženú vôľu na obe strany. Okrem obmedzenia pohybu zahŕňa tento blok aj elastické a plastické deformácie pri pohybe, preto správne nastavenie parametrov je kľúčové. Na výstupnom hriadeľi je pridaný subsystém modelu druhého enkódera a subsystém jednoduchej premenlivej záťaže (brzdneho momentu) závislej na rýchlosti motora. Jej maximum sa pohybuje okolo 15 % maximálneho možného točivého momentu generovaného motorom.

Čo sa týka zmien v pôvodnej motorovej časti modelu, pre zvýšenie dynamiku modelu je zdvojnásobený maximálny možný moment motora na hodnotu približne 80 Nm. Ďalej je ako referenčná hodnota otáčok motora nastavená žiadaná uhlová rýchlosť výstupného hriadeľa. Z hľadiska skúmania vôle v prevodoch je žiadúce motor roztočiť aj do opačného smeru. Pre tento účel je v bloku budovateľ signálu

(*Signal Builder*) navrhnutý signál, ktorý roztočí motor do oboch strán na požadované otáčky. Otáčky sú nastavené na 250 min^{-1} . Blok vektorového riadenia je modifikovaný o spätnú väzbu z výstupu mechatronického systému. Na zachytenie detailného správania javu, akým je vôľa v prevode, je nutné zmenšiť veľkosť krokovania v bloku riešenia simulácie (*Solver Configuration*).

5.3 Implementácia diagnostiky do navrhnutého modelu s vôľou v prevode

Po predstavení modelu je implementovaný algoritmus diagnostiky. Jeho základná myšlienka je založená na sledovaní polohy dvoch enkóderov. V praktickej aplikácii je jeden enkóder umiestnený na hnacom hriadeľi a druhý je umiestnený na hnanom hriadeľi. Návrh algoritmu spočíva v meraní aktuálnej polohovej veličiny a v počítaní ich vzájomnej diferencie podľa rovnice:

$$\Delta\theta(k) = \theta_2(k)G_r - \theta_1(k) \quad (5.1)$$

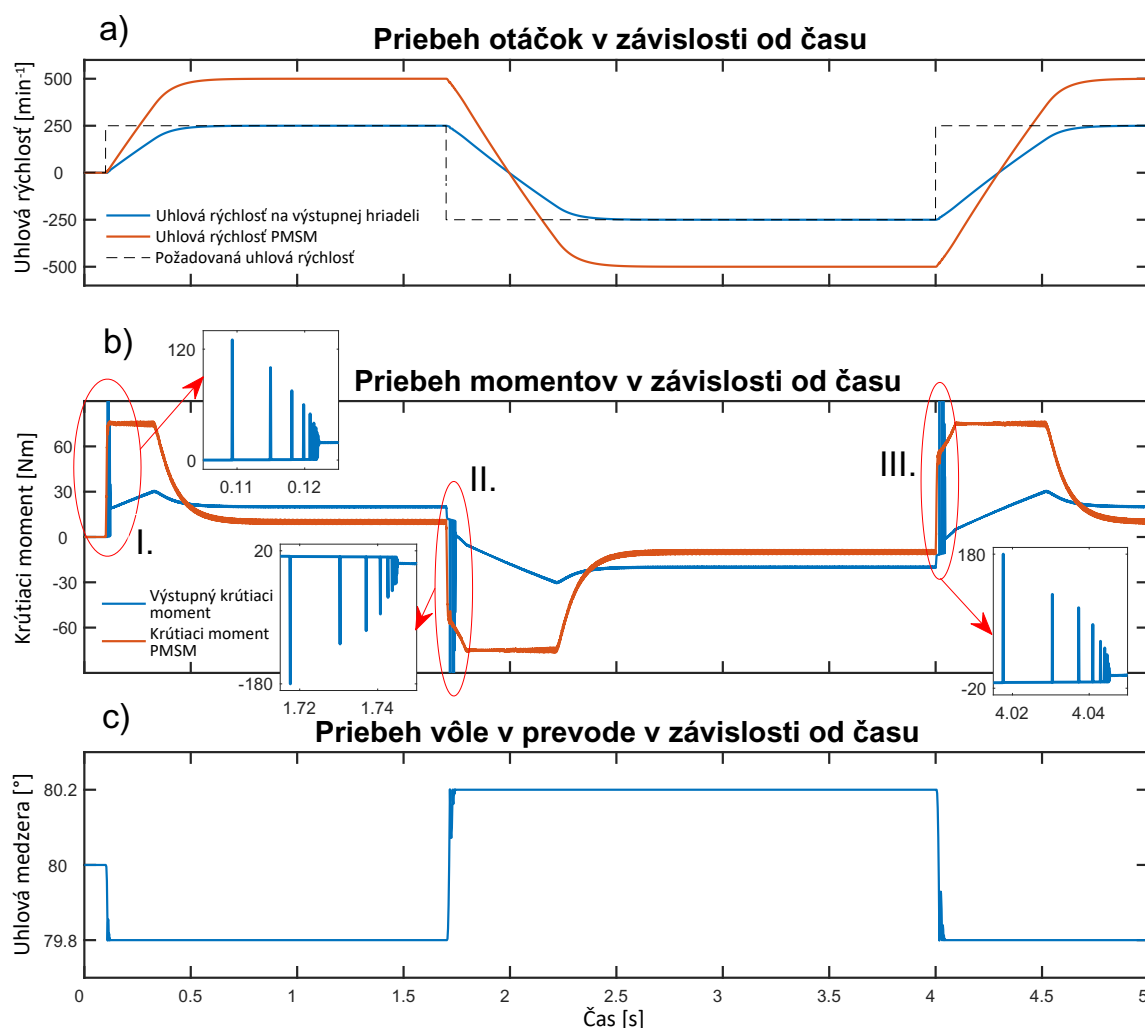
kde $\theta_1(k)$ je polohová veličina určená prvým enkóderom v k -tom kroku, $\theta_2(k)$ je polohová veličina určená druhým enkóderom v k -tom kroku, $\Delta\theta(k)$ je ich vzájomná diferencia a G_r je prevodové číslo prevodovky. Keďže hriadele sa netočia rovnakými otáčkami, k správnej funkčnosti algoritmu je nutné vynásobiť polohu výstupného hriadeľa prevodovým číslom. Predpokladá sa, že prístroje nie sú nakonfigurované na rovnakú počiatočnú polohu. Preto sa počíta diferencia maximálnej a minimálnej hodnoty podľa:

$$v(k) = \max \left\{ v(k-1), \max \left\{ \Delta\theta(k), \Delta\theta(k-1) \right\} \right\} - \min \left\{ v(k-1), \min \left\{ \Delta\theta(k), \Delta\theta(k-1) \right\} \right\} \quad (5.2)$$

kde $v(k)$ je hľadaná vôľa v kroku k . Výsledkom je vždy kladná krivka, určujúca nameranú vôľu v závislosti na čase. Vôľa v prevode je typ poruchy, u ktorej sa v reálnom chode môže skúmaný parameter len zhoršovať (je vysoko nepravdepodobné, že by sa vôľa zmenšovala). Preto nie je potrebné o tejto situácii uvažovať. Algoritmus je zakomponovaný do modelu v separátnom subsystéme. K diagnostike využíva namerané dáta polohy z namodelovaných enkóderov v subsystémoch. Vyhodnocovací algoritmus pracuje v reálnom čase, bez dodatočných ďalších analýz. Preto navrhnuté riešenie predstavuje elegantné vyriešenie problematiky merania vôle v prevodoch online a na úrovni frekvenčných meničov a bez použitia veľkého počtu komponentov a riadiacej logiky.

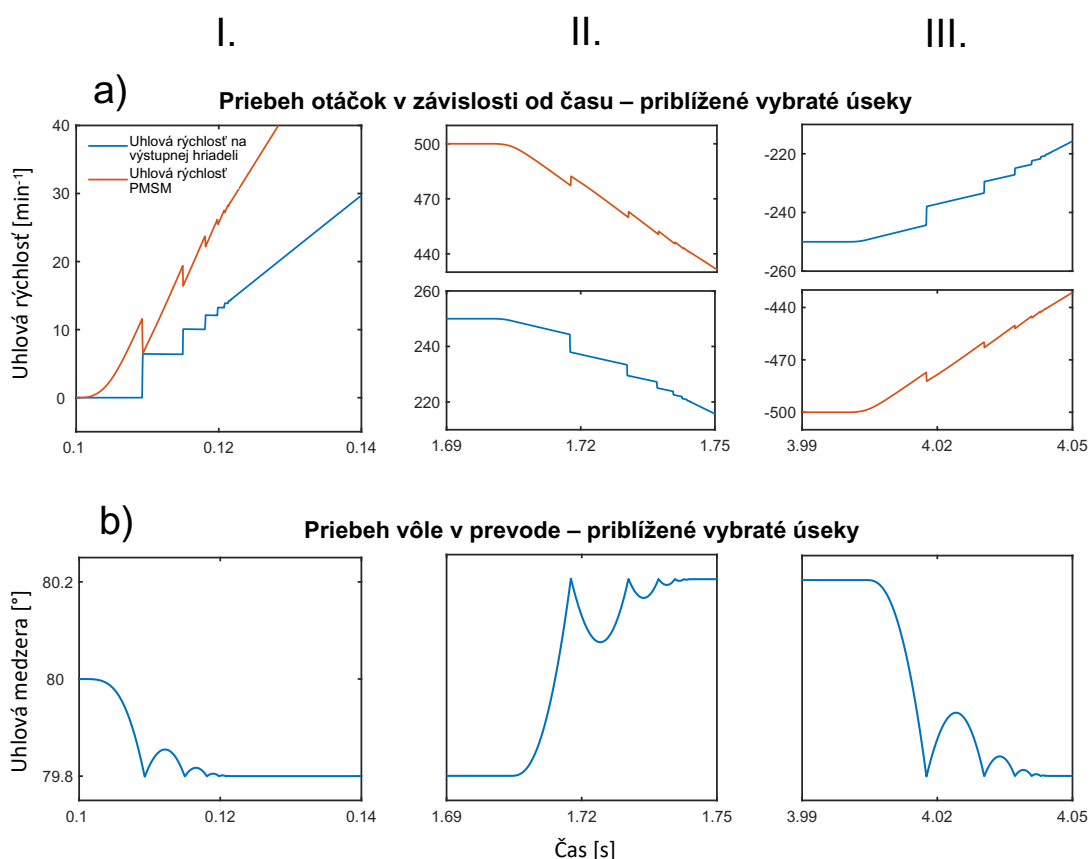
5.4 Simulácia systému s vôľou v prevode

Navrhnutý algoritmus je otestovaný na modeli z Obr. 5.2. Doba simulácie je 5 s. Počas tohto času dochádza k rozbehu PMSM na požadované otáčky v oboch smeroch podľa žiadaného signálu. Veľkosť vôľ v prevode je zvolená na hodnotu $0,4^\circ$. V bloku *Rotational Motion Hardstop* sú parametre vôľ nastavené za predpokladu, že výstupný hriadeľ má v počiatočnej pozícii z oboch strán vôľu $0,2^\circ$. Konkrétne sa bude sledovať priebeh uhlovej medzery a rýchlosť otáčok, resp. veľkosť momentu motora a výstupného hriadeľa za prevodovkou. Výsledky simulácie sú zobrazené na Obr. 5.3.



Obr. 5.3: Výsledky simulácie mechatronického systému s vôľou v prevode. V a) je priebeh požadovaných otáčok, otáčok motora a výstupného hriadeľa. V b) je zobrazený priebeh výstupného točivého momentu a generovaného momentu motorom. Ďalej sú zobrazené detaily momentových rázov. V c) je časový priebeh veľkosti medzery v prevodovke.

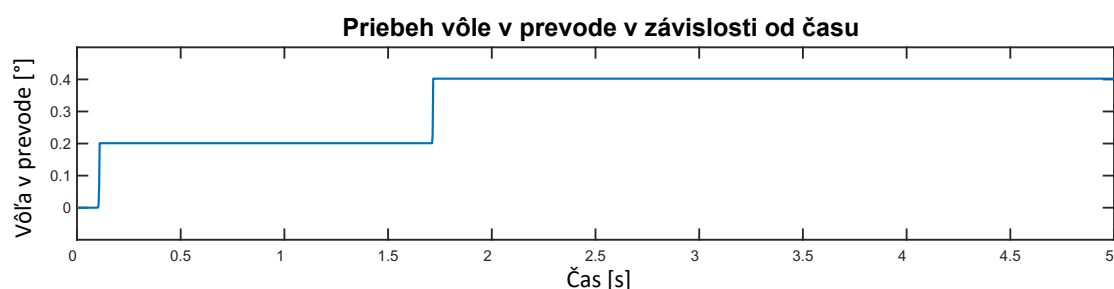
Parametre určujúce plastické deformácie pri pohybe sú predimenzované, čím je ich prejav v simulácii zanedbateľný. Toto nastavenie má však za následok nepríjemné skokové momentové rázy pri zábere zubov. Použité mechanické prvky výrazne prídali na zotrvačnosti systému, preto bol navýšený maximálny motorom generovaný moment. Ako je možné sledovať na Obr. 5.3a, zvýšením maximálneho točivého momentu motora je doba vyregulovania otáčok PMSM v porovnaní s Obr. 2.9a na približne rovnakej úrovni. Rýchlosť za prevodovkou je podľa očakávania dvakrát pomalšia ako rýchlosť motora. Ďalší obrázok (Obr. 5.3b) zobrazuje priebeh točivého momentu na výstupe a momentu generovaného PMSM. Na tomto priebehu je možné všimnúť si spomínané momentové rázy (v červenej vyznačenej oblasti), ktoré vznikajú pri zábere zubov. Tieto priebehy sú pre prehľadnosť detailnejšie zobrazené v separátnych grafoch (Obr. 5.4). Veľkosť skokového momentu je v týchto miestach niekoľkonásobne vyššia. Každým ďalším záberom je moment postupne tlmený až do úplného ustálenia. Po dosiahnutí požadovaných otáčok je prenášaný moment za prevodovkou podľa predpokladu dvakrát väčší.



Obr. 5.4: Priblíženie priebehov simulácie z Obr. 5.3 vo vybraných sektoroch. V a) je detail priebehu rýchlostí na hnacom a hnanom hriadeľi. V b) je detail priebehu medzery.

Oblasti, kde dochádza k rozbehu alebo k zmene smeru pohybu, sú z pohľadu diagnostiky vôle najzaujímavejšie. Preto sú ďalej priblížené v Obr. 5.4. Z priebehov simulácie sa dá názorne ukázať pohyb hnacieho a hnaného hriadeľa. Ak sa zameriame na prvý sektor, hnací hriadeľ sa snaží rozbehnúť hnaný hriadeľ. Pri každom zábere zubov kola je výstupný hriadeľ skokovo zrýchlený a hnací hriadeľ zase skokovo stratí rýchlosť (Obr. 5.4a). Nárazy zubov do seba sú sprevádzané spomínanými momentovými rázmi. To má za následok vytváranie medzery medzi zubami, ktorá sa každým ďalším záberom zmenšuje (Obr. 5.4b), ako výstupný hnaný hriadeľ postupne nadobúda rýchlosť. Časom zuby do seba úplne zapadnú a medzera v smere pohybu bude nulová. Obdobne tento princíp funguje aj pri zmene smeru otáčania PMSM, ako je možné vidieť v ďalších priblížených sektoroch na Obr. 5.4. Celková medzera je hľadaná vôle v prevode.

Na poslednom priebehu simulácie na Obr. 5.3c je zobrazená vzájomná diferenciacia polohových veličín nameraných enkódermi. Už samotný graf môže dosť napovedať o veľkosti vôle. Určenie vôle však po správnosti ešte nie je možné, pretože algoritmus ešte nie je ošetrený počiatočnou polohou enkóderov. Diferencia maxima a minima tohto priebehu už dáva správnu hľadanú vôľu v prevode, čo možno vidieť na Obr. 5.5. Hodnota diagnostikovanej vôle je $0,4^\circ$. Táto hodnota sedí s nastavenou vôľou počas simulácie a jej priebeh vôle je totožný s počiatočným nastavením simulácie.



Obr. 5.5: Priebeh veľkosti vôle v prevode v závislosti od času

Výsledky simulácie demonštrovali návrh diagnostiky na identifikáciu pevne nastavenej vôle v jednoduchom prevode. Navrhnutý algoritmus preto možno považovať za úspešný. Otázkou však zostáva správnosť realizácie vôle, keďže charakter priebehov výrazne závisel od parametrov (kontaktnéj tuhosti a kontaktného tlmenia), ktoré definujú plastické deformácie. Tieto parametre boli zámerne nastavené pre čo najprehľadnejšie výsledky a minimálne deformácie. Predpokladá sa, že parameter vôle v prevode sa bude časom zhoršovať a priebeh jej aktuálnej veľkosti bude ďalej monitorovaný. Algoritmus môže poslúžiť operátorovi na kvantitatívne vyhodnotenie stavu prevodovky.

Záver

Cielom tejto práce bolo monitorovať stav synchronného motora s permanentnými magnetmi, navrhnúť možné prístupy diagnostiky a otestovať riešenie. Zadanie práce bolo rozdelené na teoretickú a praktickú časť.

V prvej kapitole bol čitateľ uvedený do problematiky synchronných motorov. Postupne boli predstavené teoretické základy, použité matematické aparáty a myšlienka vektorového riadenia. Súčasťou kapitoly bol aj úvod do diagnostiky systémov, v ktorom boli popísané niektoré metódy prediktívnej diagnostiky (vibrodiagnostika, MCSA a jej rozšírené varianty).

Druhá kapitola obsahuje predstavenie predpripraveného modelu PMSM v Simulinku. Konkrétne boli podrobne rozobraté bloky PMSM, model vektorového riadenia, model frekvenčného meniča a model enkódera. Ešte predtým bol predstavený softvér MATLAB & Simulink a jeho rozšírenie Simscape, v ktorom bola realizovaná praktická časť tejto práce. V rámci knižnice Simscape boli popísané základy fyzikálneho modelovania a modelovanie mechatronických systémov. Tieto teoretické východiská boli ďalej využívané v praktickej časti. V súlade so zadaním boli navrhnuté možnosti implementácie poruchy do modelu. V závere tejto kapitoly bol pôvodný bezporuchový model otestovaný simuláciou.

Experimentálna časť tejto práce, návrhy modelov a riešenia diagnostiky boli analyzované vo zvyšných troch kapitolách. Do predpripraveného modelu riadenia PMSM boli pridané bloky, ktoré reprezentovali poruchové stavy. Vzhľadom na širokú škálu porúch, do modelu boli implementované iba mechanické poruchy. Každá kapitola sa týkala inej mechanickej poruchy a na každú poruchu bol využitý iný prístup diagnostiky. Principiálne je možné metódy diagnostiky aplikovať aj na iné problematické časti systému. Platnosť a dôveryhodnosť týchto metód je však nutné ďalej overiť na reálnom mechatronickom systéme.

Tretia kapitola sa týkala problematiky drhnutia na motore. Tento poruchový stav bol reprezentovaný brdným skokovým momentom, ktorý pôsobil v protismere pohybu. Prediktívna diagnostika spočívala v použití metódy sledujúcej Parkov vektor, t. j. meranie trojfázového napájacieho prúdu, aplikovanie Clarkovej transformácie a vykreslenie zložiek do grafu. Pre účely diagnostiky bol naprogramovaný algoritmus, ktorý detekoval kruhové obrazce. Vybratý vzor bol užívateľom vyhodnotený naprogramovanými kvantitatívnymi kritériami ako ideálny polomer vzoru, maximálny polomer, vychýlenie a kvadratické kritérium kvality. V bezporuchovom stave je obrazec ideálny kruh. Pri postupnom zväčšovaní pôsobenia poruchy sa však obrazec stále viac deformoval, vypočítaný ideálny priemer sa lineárne zväčšoval a kvadratické kritérium sa exponenciálne zväčšovalo v závislosti od vážnosti poruchy. Tieto indikátory boli potom využité pri vyhodnocovaní stavu motora.

Štvrtá kapitola sa venovala ložiskovým závadám, konkrétne išlo o poruchy na valivých ložiskách. Modelovanie ložiska bolo značne limitované softvérovým vybavením (Simulinku a jeho rozšírenia Simscape), ktorý neposkytoval blok jednoduchého ložiska. Riešenie modelu ložiska bolo nakoniec nepriamo navrhnuté z prenášanej energie mechanicko-rotačnej domény a zo znalostí pôsobenia kritických frekvencií. Tie boli určené z geometrických rozmerov vybratého ložiska. Implementovaná porucha mala rovnaký princíp ako v predošlej kapitole. Simuláciami bolo zobrazené, že grafické vyhodnotenie a použitie metódy sledujúcej Parkov vektor boli z hľadiska identifikácie poruchy na vonkajšom, resp. vnútornom krúžku neefektívne. Preto bola použitá jej rozšírená varianta EPVA, ktorá zobrazovala frekvenčné spektrum modulu Parkovho vektora. Zo získaných spektier boli jednoznačne identifikované harmonické zložky, ktoré reprezentovali poruchu na vonkajšom krúžku ložiska ($f_{ord} = 78 \text{ Hz}$) a poruchu na vnútornom krúžku ložiska ($f_{ird} = 57 \text{ Hz}$). Otáznou však zostáva správnosť riešenia, keďže sa nepoužíval priamo model ložiska. Prvotné riešenie pracovalo z rozšírenou knižnicou Simscape Multibody™, ktorá umožnila dodať model ložiska a prepojiť ho s modelom riadenia PMSM. Problematickým však bolo zakomponovanie poruchových stavov, keďže rozšírenie nepodporovalo povrchové úpravy ložiska, ktoré by mohli reprezentovať poruchový stav. Možným riešením by bolo namodelovanie problematickej časti v softvéri Inventor a vyexportovanie súčiastky do modelu. Potom by bola možná priama práca s ložiskom.

V poslednej piatej kapitole bol navrhnutý jednoduchý model mechatronického systému s vôľou v prevodovke. Vôľa v prevode bola nastavená na hodnotu $0,4^\circ$ a bola naimplementovaná pomocou bloku obmedzenia rotačného pohybu. Algoritmus diagnostiky bol založený na meraní polohovej veličiny pomocou namodelovaných enkóderov na vstupnom a výstupnom hriadeli. Po roztočení PMSM do oboch strán sa počítala diferencia maximálnej a minimálnej hodnoty. Výsledkom bol priebeh aktuálnej vôle v reálnom čase a jej zmeraná veľkosť bola $0,4^\circ$. Tým bolo možné diagnostiku považovať za úspešnú.

Literatúra

- [1] HORŇAN, Bohdan. *Monitorování stavu elektrických pohonů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131037>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Blaha.
- [2] GIERAS, Jacek F.; WING, Mitchel. *Permanent Magnet Motor Technology - Design and Applications*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 2002. ISBN: 0-8247-0739-7.
- [3] Climat-Stille. Permanentmagnet synchronmotor. *climat-stile.ru* [online] Industriewerkzeuge Ausrüstung © 2020 [cit. 2020-11-22] Dostupné z: <https://climat-stile.ru/permanentmagnet-synchronmotor/>.
- [4] PARMAR, Y.; PATEL, P.; PANCHOLI, N.; THAKOR Ch.; MALI, U. Scalar control of Permanent Magnet Synchronous motor. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016, Volume: 03 Issue: 12, s. 364. E-ISSN: 2395 -0056. Dostupné z: <https://www.irjet.net/archives/V3/i12/IRJET-V3I12123.pdf>.
- [5] MOHAN, Ned. *Advanced Electric Drives: Advanced Electric Drives: Analysis, Control and Modeling Using Simulink*. John Wiley & Sons, Inc., 2014. ISBN: 978-1-118-48548-4.
- [6] 3-phase Sensorless Single-Shunt CurrentSensing PMSM Motor Control Kit with MagniV MC9S12ZVM [online]. NXP Semiconductors, 2016 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN5327.pdf>.
- [7] CARDOSO, Antonio J. Marques, ed. *Diagnosis and Fault Tolerance of Electrical Machines Power Electronics and Drives*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2018. ISBN: 979-1-78561-532-0.
- [8] BONALDI, E.L.; de OLIVIERA, L.E.L.; LAMBERT-TORRES, G.; SILVA, L.E. *Proposing a Procedure for the Application of Motor Current Signature Analysis on Predictive Maintenance of Induction Motors*. Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnosis Monitoring Management - COMADEM 2007, Faro, Portugal, Jun. 13-15, 2007.
- [9] TAVNER, P.J.; RAN, Li; PENMAN, Jim; SEDDING, Howard. *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. Bibliovault OAI Repository, 2008, the University of Chicago Press. Dostupné z:

- <https://www.researchgate.net/publication/37723373> Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines.
- [10] BONALDI, E.L.; da SILVA, J.G.B.; OLIVIERA, L.L.; LAMBERT-TORRES, G. *Predictive maintenance by electrical signature analysis to induction motors*. In *Induction Motors — Modelling and Control*, 1st ed.; InTech: Vienna, Austria, 2012. Dostupné z: [https://www.intechopen.com/books/induction - motors - modelling - and-control/predictive-maintenance-by-electrical - signature - analysis - to - induction - motors](https://www.intechopen.com/books/induction-motors-modelling-and-control/predictive-maintenance-by-electrical-signature-analysis-to-induction-motors).
 - [11] Motors don't just fail... do they? A guide to preventing failure: Why motors fail [online]. ABB, 2015 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: https://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/motors_ebook.pdf?sfvrsn=4.
 - [12] BONETT, A.H.; SOUKUP, G.C. *Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, (1992), Vol.28, No.4, (July/August 1992), pp. 921-937, ISSN 0278-0046.
 - [13] TSYPKIN, Mikhail. *Induction motor condition monitoring: Vibration analysis technique - A practical implementation* 2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Niagara Falls, ON, 2011, pp. 406-411, doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994629. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5994629>.
 - [14] YEBENBAY, Yerdos; ALIMKHAN, Aisultan. *Vibration monitoring of motors*. Electrical and Computer Engineering Departmen, Nazarbayev University, Astana. 10.13140/RG.2.2.19428.42880. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/332015327> Vibration monitoring of motors/citations.
 - [15] ZAREI, Jafar; POSHTAN, Javad. *An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection*. Tribology International, Volume 42, Issue 2, 2009, Pages 213-219, ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X08001291>.
 - [16] MILJKOVIC, Dubravko. *Brief Review of Motor Current Signature Analysis*. CrSNDT Journal. 2015, 14-26. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/304094187> Brief Review of Motor Current Signature Analysis.

- [17] MEHALA, Neelam; DAHIYA, Ratna. *Rotor Faults Detection in Induction Motor by Wavelet Analysis*. International Journal of Engineering Science and Technology Vol.1(3), 2009, 90-99. Dostupné z: https://idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical-engineering/Rotor-20Faults-20Detection-20in-20Induction-20Motor-20by-20Wavelet-20Analysis.pdf
- [18] CARDOSO, A.J. Marques; CRUZ, S.M.A.; CARVALHO, J.F.S.; SARAIVA, E.S. *Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-phase Induction Motors, by Park's Vector Approach*. 1995 Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, 642–646, DOI:10.1109/ias.1995.530360
- [19] ABITHA, Memala; VEERARAGHAVALU, Rajini. *Park's vector approach for online fault diagnosis of induction motor*. 2013 International Conference on Information Communication and Embedded Systems, ICICES 2013. 1123-1129. 10.1109/ICICES.2013.6508332. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/261469852_Park%27s_vector_approach_for_online_fault_diagnosis_of_induction_motor.
- [20] CRUZ S.M.A.; CARDOSO, A.J. *Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach*. Electric Machines & Power Systems, 28:4, 289-299, DOI:10.1080/073135600268261.
- [21] MATLAB. *In: Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 22. 11. 2020 [cit. 2020-11-23]. Dostupné Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB>.
- [22] HORŇAN, Bohdan. *Adaptivní regulátor s průběžnou identifikací soustavy* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-12-7]. <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116645>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Stanislav Lang.
- [23] MATLAB. Basic Principles of Modeling Physical Networks. *mathworks.com* [online] © 1994-2020 The MathWorks, Inc. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/basic-principles-of-modeling-physical-networks.html>.
- [24] MATLAB. Three-Phase PMSM Drive. *mathworks.com* [online] © 1994-2020 The MathWorks, Inc. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2020a/physmod/sps/examples/three-phase-pmsm-drive.html> responsive offcanvas.

- [25] MATLAB. PMSM Field-Oriented Control. *mathworks.com* [online] © 1994-2020 The MathWorks, Inc. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/pmsm_field_oriented_control.html.
- [26] MATLAB. PWM Generator (Three-phase, Three-level) *mathworks.com* [online] © 1994-2020 The MathWorks, Inc. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/pwm_generator_three_phase_three_level.html.
- [27] OHAD, Gal. *fit_ellipse*. MATLAB Central File Exchange [cit. 2021-3-29]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fit_ellipse.
- [28] TANDON, N.; CHODHURY, A. *A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings*. (1999), Tribology International, 32(8), 469–480. doi:10.1016/s0301-679x(99)00077-8.
- [29] MILLER, Steve. *Simscape Multibody Contact Forces Library*, GitHub, 2021 [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: <https://github.com/mathworks/Simscape-Multibody-Contact-Forces-Library/releases/tag/21.1.5.0>.
- [30] VAIMANN, T.; KALLASTE, A.; KILK A. *Sensorless Detection of Induction Motor Rotor Faults Using the Clarke Vector Approach* Scientific Journal of Riga Technical University, 2011, vol. 29, pp. 43-48.
- [31] SDP/SI. How backlash affects gears, Elements of Metric Gear Technology (Cont.). *sdp-si.com* [online] © 2021 Designatronics Inc. 2021 [cit. 2021-3-31]. Dostupné z: <https://www.sdp-si.com/resources/elements-of-metric-gear-technology/page7.php>.

Zoznam symbolov a skratiek

1D	One-Dimensional
2D	Two-Dimensional
3D	Three-Dimensional
DC	Direct Current
FOC	Field Oriented Control
FFT	Fast Fourier Transform
IGBT	Insulated-gate Bipolar Transistor
IPMSM	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
MCSA	Motor Current Signature Analysis
MTPA	Maximum Torque Per Ampere
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PWM	Pulse Width Modulation
RMF	Revolving Magnetic Field
SMPMSM	Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
d	Priemer valivej guličky v ložisku
D	Stredný priemer ložiska
f_{bd}	Frekvencia defektu valivej guličky (<i>Ball Defect Frequency</i>)
f_c	Klietková frekvencia (<i>Cage Frequency</i>)
f_e	Napájacia frekvencia
f_{ird}	Frekvencia defektu na vnútornom krúžku ložiska (<i>Inner Race Defect Frequency</i>)
f_m	Modulovaná frekvencia

f_{ord}	Frekvencia defektu na vonkajšom krúžku ložiska (<i>Outer Race Defect Frequency</i>)
f_s	Frekvencia otáčania hriadeľa (<i>Shaft Frequency</i>)
f_v	Charakteristická frekvencia poruchy
G_r	Prevodové číslo (<i>Gear Ratio</i>)
H	Vysoká úroveň (<i>High</i>)
$i(t)$	Okamžitý prúd
$i_{a,b,c}$	Trojfázové prúdy
i_α	Reálna prúdová zložka v α - β súradniciach
i_β	Imaginárna prúdová zložka v α - β súradniciach
i_d	Tokotvorná prúdová zložka v d-q súradniciach
$i_{d\text{ref}}$	Referenčná tokotvorná prúdová zložka v d-q súradniciach
i_q	Magnetotvorná prúdová zložka v d-q súradniciach
$i_{q\text{ref}}$	Referenčná magnetotvorná prúdová zložka v d-q súradniciach
i_M	Maximálna hodnota napájacieho prúdu α - β súradniciach
J	Hodnota diskrétného kritéria
k	Krok
L	Nízka úroveň (<i>Low</i>)
L_d	Pozdĺžna indukčnosť
L_q	Priečna indukčnosť
n	Počet guľčiek
$p(t)$	Okamžitý výkon
R_{av}	Priemerný polomer kruhového útvaru
T_{st}	Periódna vzorkovania (<i>Sampling Time</i>)
θ	Kontaktný uhol

θ_1	Polohová veličina z prvého enkóderu
θ_2	Polohová veličina z druhého enkóderu
θ_e	Okamžité uhlové natočenie rotora
$\hat{\theta}(k)$	Odhad neznámeho koeficientu v kroku k
v_d	Zložka napäťového akčného zásahu v d-q súradniciach
v_q	Zložka napäťového akčného zásahu v d-q súradniciach
$u(t)$	Okamžité napätie
t	Časová veličina
v	Vôľa v prevode v kroku k
ω	Uhlová frekvencia
π	Ludolfovo číslo
y	Nameraná hodnota v kroku k